

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015

Bc. David Polok

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Analýza a návrh jeřábového asynchronního
motoru**

**Analysis and Design of Asynchronous Motor for
Crane**

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Polok**
Studijní program: **N2649 Elektrotechnika**
Studijní obor: **3907T001 Elektroenergetika**
Téma: **Analýza a návrh jeřábového asynchronního motoru**
Analysis and Design of Asynchronous Motor for Crane

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor činnosti as. motoru, konstrukce, provedení
3. Specifika návrhu zdvihového jeřábového motoru
4. Proveďte návrh jeřábového 3f asynchronního motoru zvoleného výkonu
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- KOPYTLOV, Igor, Petrovič. Stavba elektrických strojů, 1988, Praha, SNTL/MIR
- CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
- KAČOR, Petr. Vybrané typy elektrických strojů, Ostrava, 2010, VŠB-TU Ostrava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické *www stránky*
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014
Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Růsek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal

V Ostravě dne 5. Května 2015


Podpis.....

Poděkování

Především děkuji svému vedoucímu diplomové práce, kterým byl Ing. Petr Kačor, Ph, D. a panu Ing. Václavu Čechovi, Ph, D. za vhodnou metodickou a odbornou pomoc při zpracování této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá analýzou a návrhem třífázového asynchronního kroužkového motoru pro pohon zdvihu teleskopického jeřábu kategorie H, s nosností 10 000 kg. První část práce se zabývá teorií asynchronních motorů, jejich principy, funkcí, konstrukcí a dělení. V následujících kapitolách jsou řešena specifika a dimenzování asynchronního motoru kroužkového pro danou problematiku. Dále následuje kapitola vlastního návrhu a výpočet trojfázového asynchronního kroužkového motoru o výkonu 60 kW se zatěžovatelem 40%. V souladu s normou ČSN 35 0000. Pro typovou volbu komerčně nabízených asynchronních motorů, je vybrán motor od firmy Siemens Elektromotory s.r.o.

Abstract

This thesis deals with the analysis and design proposal of asynchronous ring-shaped motor for telescopic crane hoist drive of H category, with a capacity of 10,000 kg. The first part of dissertation deals with the theory of asynchronous motors, their principles, functions, design and division. Further, there is followed own design chapter and calculation of three-phase asynchronous ring-shaped motor with 60 kW capacity and 40% load factor. All in accordance with the CSN 35 0000. There was decided to choose motor from Siemens Elektromotory s.r.o. Company as the optional model of commercially offered asynchronous/ induction motors.

Klíčová slova

Třífázový asynchronní motor, kotva kroužková, jeřáb, zdvih, stator, rotor.

Key word

Three-phase asynchronous motor, anchor ring, crane, stroke, stator, rotor.

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	Lineární hustota proudu	Am-1
a	Počet paralelních větví	
a	Rozměry vinutí	m
B	Magnetická indukce	T
b	Rozměry vinutí	m
b ₀	Otevření dráky	m
D	Průměr	m
d	průměr	m
D _e	Průměr Statoru	m
E	Elektromotorické napětí	V
F _m	Magnetomotorické napětí	V
F	Síla	N
f	Frekvence	Hz
f ₁	Frekvence statorového napětí	Hz
f ₂	Frekvence rotorového napětí	Hz
H	Intenzita magnetického pole	A·m ⁻¹
h	Výška	m
h _d	Hloubka drážky	m
h _m	Vzdálenost mezi vrstvami vinutí	m
h ₀	Výška otevření drážky	m
I	Proud	A
I ₁	Proud Statoru	A
I ₂	Proud Rotoru	A
I _N	Jmenovitý proud	A
I _μ	Magnetizační proud	A
I ₀	Proud naprázdno	A
I ₍₀₎	Proud as motoru při synchronních otáčkách	A
I _č	Činný proud	A
I _j	Jalový proud	A
J	Hustota proudu	A·m ⁻²
K	Činitel	
k	Činitel	
k _c	Carterův činitel	
k _B	Činitel tvaru pole	
k _{Fe}	Činitel plnění železa	

k_t	Činitel rozlohy vinutí	
k_v	Činitel vinutí	
k_y	Činitel kroku vinutí	
k_μ	Činitel nasycení magnetického obvodu	
k_γ	Činitel natočení drážek	
L	Indukčnost	H
L	Délka indukční čáry	m
l	Délka	m
l_i	Ideální délka stroje	m
l_{Fe}	Délka železa	m
l_1, l_2	Celková délka statoru, rotoru	m
M	Moment	N·m
M_{max}	Maximální moment	N·m
M_{zv}	Moment zvratu	N·m
M_z	Záběrný moment	N·m
M_b	Moment bubnu	N·m
m	Počet fází	
m	Hmotnost	m
m_{max}	Momentová přetížitelnost	%
N_1	Počet závitů statoru	
N_2	Počet závitů rotoru	
N_k	Počet kartáčků	
n	Otáčky synchronní	ot·min ⁻¹
n_s	Otáčky asynchronní	ot·min ⁻¹
n_{bub}	Otáčky bubnu	ot·min ⁻¹
O_{bub}	Obvod bubnu	m
P	Činný výkon	W
P_i	Elektromagnetický výkon	W
P_1	Příkon	W
P_2	Výkon na hřídeli	W
p	Počet pólových dvojic	
ΔP	Ztráty	W
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty	W
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe	W
ΔP_d	Přídavné ztráty statoru	W
Q	Počet drážek	

Q_p	Počet drážek na pól	
Q	Nosnost jeřábu	kg
Q_c	Celková nosnost	kg
q	Počet drážek na pól a fázi	
R	Odpor	Ω
R_1	Odpor statorového vinutí	Ω
R_2	Odpor rotorového vinutí	Ω
s	Skluz	%
s_{\max}	Skluz zvratu	%
t	Čas	s
t_d	Drážková rozteč	m
t_p	Pólová rozteč	m
U	Napětí	V
U_i	Indukované napětí	V
U_k	Úbytek napětí na kartáčích	V
V	Počet vodičů	
V_d	Počet vodičů v drážce	
v	Rychlost	$m \cdot s^{-1}$
v_{zdv}	Rychlost zdvihu	$m \cdot min^{-1}$
X	Reaktance	Ω
X_σ	Rozptylová reaktance	Ω
y	Krok vinutí	
y_d	Krok vinutí drážky	
Z	Impedance	Ω
α	Činitel	
β	Zkrácení kroku	
γ	Úhel natočení drážek	
δ	Velikost vzduchové mezery	m
δ_i	Tloušťka izolace	m
η	Účinnost	%
λ	Štíhlostní poměr	
ξ	Činitel	
σ	Činitel rozptylu	

Obsah

1. Úvod	1
2. Teoretický rozbor asynchronního motoru	2
2.1. Princip činnosti AS motoru	2
2.2. Pracovní stavy asynchronního motoru	3
2.2.1. AS motor jako brzda.....	3
2.2.2. AS motor ve stavu motorickém.	4
2.2.3. AS motor ve stavu jako generátor	4
2.3. Momentová charakteristika	5
2.4. Indukované napětí a proud	5
2.5. Magnetomotorické napětí.....	6
2.6. Náhradní schéma jedné fáze třífázového asynchronního motoru.....	6
2.7. Výkonová bilance asynchronního motoru.....	7
2.8. Kruhový diagram asynchronního motoru.....	9
2.9. Definice asynchronního motoru	10
2.9.1. Rozdělení asynchronního motoru.....	10
2.10. Základní údaje	11
2.10.1. Tvar motoru.....	11
2.10.2. Chlazení motoru	11
2.10.3. Krytí motoru	12
2.10.4. Štítek motoru	13
2.11. Konstrukce.....	14
2.9.2. Stator	14
2.9.3. Rotor.....	15
2.9.4. Magnetický obvod	16
2.9.5. Ložiska	16
2.9.6. Kostra motoru.....	17
2.9.7. Ventilace motoru	17
2.9.8. Vinutí.....	17

2.12.	Druhy klecových vinutí	18
2.10.1.	Vírové klece	18
2.10.2.	Dvojité klece.....	18
2.13.	Rozběh as motoru kroužkového	19
2.14.	Odporníky.....	20
3.	Specifika návrhu zdvihového jeřábového motoru	21
3.1.	Definice jeřábu	21
3.2.	Parametry a dělení jeřábů	21
3.1.1.	Dělení jeřábů podle skupin zařazení:.....	21
3.1.2.	Další možné dělení:	21
3.1.3.	Ocelové konstrukce (nosníky) jeřábu mohou být:.....	21
3.1.4.	Druhy jeřábu:.....	22
3.1.5.	Jeřábová kočka	22
3.3.	Zdvihací zařízení kočky	23
3.4.	Určení výkonu motoru zdvihu.....	24
3.5.	Parametry zdvihu jeřábů.....	25
3.5.1.	Určení druhu zatížení	25
3.5.2.	Normalizovaný druh zatížení	26
3.6.	Parametry zdvihu jeřábů.....	26
4.	Provedte návrh jeřábového 3f asynchronního motoru zvoleného výkonu	28
4.1.	Volba hlavních rozměrů	28
	Stanovení délky vzduchové mezery:	29
	Štíhlostní poměr:	30
4.2.	Návrh drážek statorového vinutí	30
	Drážková rozteč:.....	31
4.3.	Výpočet rotoru.....	35
4.4.	Výpočet magnetického obvodu	38
4.5.	Výpočet odporů reaktancí.....	42
4.6.	Výpočet ztrát	47

4.7.	Chod naprázdno.....	51
4.8.	Výpočet charakteristik.....	51
4.9.	Typová volba asynchronního motoru na trhu.....	54
5.	Závěr.....	59
	Literatura	60

Seznam obrázků

Obrázek 1. Působící síly na rotor	2
Obrázek 2. Provozní stavy AS motoru	3
Obrázek 3. Momentová charakteristika AS motoru	5
Obrázek 4. Náhradní schéma AS motoru	7
Obrázek 5. Výkonová bilance asynchronního motoru	8
Obrázek 6. Kruhový diagram asynchronního motoru	9
Obrázek 7. Asynchronní motor	10
Obrázek 8. Přírubový a patkový AS motor	11
Obrázek 9. Štítek motoru.....	13
Obrázek 10. Konstrukční části AS motoru kroužkového	14
Obrázek 11. Zapojení statorového vinutí na napájení	15
Obrázek 12. Rotorová klec nakrátko	15
Obrázek 13. Ložisko.....	16
Obrázek 14a.-Chlazení na rotoru, b.-vlastní chlazení, c.-cizí chlazení	17
Obrázek 15. Odporový spouštěč a momentová charakteristika s jednotlivými zařazenými odpory.	19
Obrázek 16. Stkyáč VH 240 zapojený v obvodu ovládání zdvihu jeřábu.	19
Obrázek 17. Odporník typ SOU pro zdvih jeřábů.....	20
Obrázek 18. Vybrané typy provedení jeřábů.....	22
Obrázek 19. Mostový jeřáb z teleskopy a traverzou	22
Obrázek 20. Zvedací ústrojí kočky jeřábu.....	23
Obrázek 21. Průběhy oteplení zatížení S3.....	25
Obrázek 22. Závislost D_e na k_E	29
Obrázek 23. Hodnoty účinnosti a účinnosti AS motoru.....	29
Obrázek 24. Lineární hustota proudu a magnetické indukce ve vzduchové mezeře AS.....	30
Obrázek 25. Štíhlostní poměr	30
Obrázek 26. Střední hodnota součinitele A_J	33
Obrázek 27. Drážka statoru	35
Obrázek 28. Velikost vzduchové mezery	35
Obrázek 29. Rozměry drážky rotoru	37
Obrázek 30. a) Činitel Δz v závislosti na b_0/δ ab_0/td_1 , b) činitel k'' v závislosti na krácení kroku β	45
Obrázek 31. Činitel $k\beta''$ v závislosti na poměrném zkrácení kroku vinutí β a zlomkové části čísla q .	46
Obrázek 32. Kartáček s rozměry	50
Obrázek 33. Kroužkový motor Siemens.	55
Obrázek 34. Rozměry asynchronního kroužkového motoru Siemens.....	56

Seznam tabulek

Tabulka 1. Parametry pohonu zdvihu jeřábu.....	26
Tabulka 2. Vnější průměry statorových plechů v závislosti na osově výšce.....	28
Tabulka 3. Činitel K_D pro různé počty pólů.	28
Tabulka 4. Rozměry drážky statoru.....	33
Tabulka 5. Rozměry rotorové drážky.	37
Tabulka 6. Rozměrů drážky rotoru.....	37
Tabulka 7. Vypočtené hodnoty charakteristiky motoru 60 kW.....	52
Tabulka 8. Momenty	54
Tabulka 9. AS motor Siemens parametry.....	55
Tabulka 10. Rozměry Asynchronního motoru Siemens P280M08.....	56
Tabulka 11. Srovnání parametrů motorů výpočteného, navrhnutého a stávajícího.	58

Seznam grafů

Graf 1. Zatěžovací charakteristika Navrženého motoru v závislosti P_1 , I_1 , $\cos\varphi$, účinnost η na P_2	53
Graf 2. Charakteristika účinnosti a účinníku.	54

1. Úvod

Asynchronní stroje patří mezi nejrozšířenější střídavé elektrické stroje. Tyto stroje mohou pracovat jako motory a přeměňovat tak elektrickou energii na mechanickou nebo jako generátory, které elektrickou energii přeměnou z mechanické energie. Jejich největší uplatnění je v režimu motorickém. Vyrábí se v širokém rozsahu výkonů od desítek W do tisíců kW. Používaná velikost napájecí frekvence střídavého proudu u těchto strojů je 50 Hz v ČR.

Asynchronní motory jsou jedny z nejvíce používaných elektrických pohonů a to zejména pro svou konstrukční jednoduchost, spolehlivost a nenáročnost na údržbu. Z tohoto důvodu je možné se s nimi setkat zejména v průmyslu, ale také v domácnostech, kde slouží pro pohon chladniček, čerpadel, ventilátorů a dalších zařízení.

V těžkém průmyslu, jako jsou hutě, mají jeřáby početné využití od malých skladových jeřábů kategorie O2 (jeřáby ovládané ze země), až po jeřáby kategorie H (ovládaný s kabiny jeřábu), které mají nosnost břemene až 250 tun. Na tyto jeřáby jsou kladeny náročné požadavky od bezpečnosti až po dlouhodobý bezporuchový provoz.

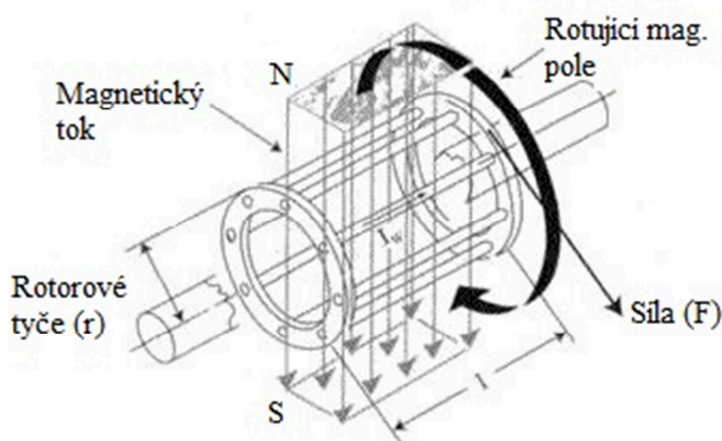
Tato diplomová práce se bude zabývat rozbořem kroužkového motoru zdvihu traverzového jeřábu s nosností 10 t, využívaných na válcovnách TŽ. Zde jsou používány pro zdvih jeřábu motory MEZ Frenštát HRP 1142 S/8 rok výroby 1960. Motory během několika desítek let prošly několika opravami, od ložisek až převinutí vinutí jak rotoru, tak i statoru a to opakovaně. Tudíž parametry motoru neodpovídají katalogovým hodnotám. Proto bude přiblížen rozbor asynchronního motoru kroužkového a vlivy působící na tyto motory.

V průběhu několika let bude nutná obměna rozvaděčů a rozvodu jeřábu, tak i jednotlivých motorů. Proto bude i navržena možná náhrada novodobých motorů za nyní používané HRP 1142 S/8. Tak aby splňovala požadované kritéria a parametry pro daný provoz.

2. Teoretický rozbor asynchronního motoru

2.1. Princip činnosti AS motoru

Připojením třífázového elektrického napětí na svorky motoru, začne statorovým vinutím protékat třífázový elektrický proud, který vytvoří točivé magnetické pole. Toto točivé magnetické pole indukuje napětí v rotorovém vinutí. V rotorové kleci začne protékat třífázový proud, který vytvoří magnetické pole. Vzájemnou interakcí obou magnetických polí dochází ke vzniku točivého momentu a třífázový motor se roztočí. [3],[5],[6].



Obrázek 1. Působící síly na rotor

Otáčky rotoru budou mít hodnotu vždy menší než synchronní otáčky sítě n_s .

$$\frac{60 \cdot f}{p} [\text{min}^{-1}] \quad (2.1)$$

Rozdíl mezi otáčkami točivého magnetického pole statoru a skutečnými otáčkami rotoru se vyjadřuje pomocí tzv. skluzu s , která je dána vztahem:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} [-] \quad (2.2)$$

Velikost skluzu je dána dvěma stavy. A to když $s = 0$ znamená, že se z asynchronního motoru stává asynchronní generátor. Při hodnotě skluzu $s = 1$ se motor nachází ve stavu nakrátko, tzn., že rotor motoru se neotáčí.

Dynamické brzdění – (Stejnoseměrná brzda) statorové vinutí se odpojí od sítě a připojí se na zdroj stejnosměrného proudu. Magnetické pole statoru je tedy nepohyblivé a pohybující se rotor sám vytváří brzdňý moment. Velikost brzdňého momentu je možno regulovat velikostí stejnosměrného proudu. Tento způsob není moc účinný při vyšších otáčkách. A při otáčkách blízkých nule se musí motor dobrzdit mechanicky. Motor s použitím tohoto typu brzdění se velice zahřívá.

2.2.2. AS motor ve stavu motorickém.

V tomto stavu může motor nabývat dvou stavů a to stavu nakrátko a naprázdno. AS motor na krátko Je to stav při zabrzděném rotoru, otáčky jsou nulové. Tento stav dost přesně odpovídá stavu nakrátko transformátoru. Statorové a rotorové (točivé) pole působí proti sobě a výsledný tok je velmi malý, ve stroji v podstatě existují jenom rozptylové toky. Při měření proto proud stoupá s napětím velmi rychle a dosahuje jmenovité hodnoty při malém napětí. Charakteristika je lineární. Ztráty v železe jsou zanedbatelné, ztráty vznikají pouze průtokem proudu přes odpory obou vinutí – Jouleovy ztráty. Účinník je při tomto měření téměř konstantní, je dán pouze poměrem odporů a rozptylových reaktancí a dosahuje hodnoty cca 0,5. Při proudu $I > I_n$ se může stát, že rozptylový tok procházející zuby drážek nasytí tuto část magnetického obvodu, což fyzikálně odpovídá zvětšení vzduchové mezery a charakteristika se mírně zlomí k vyšším proudům.

AS motor ve stavu naprázdno - Stavem naprázdno rozumíme případ, kdy se motor točí bez zátěže na hřídeli. Otáčky motoru jsou téměř synchronní, rotor je brzděn pouze ventilačními ztrátami a třením v ložiskách. Rotorovým vinutím protéká zanedbatelný proud, Jouleovy ztráty v rotorovém vinutí jsou prakticky nulové. Stroj odebírá ze sítě činný výkon na pokrytí mechanických ztrát a ztrát v železe statoru (rotor se otáčí téměř stejně rychle jako točivé pole, ztráty v železe rotoru jsou zanedbatelné) a hlavně jalový výkon na vytvoření magnetického pole. Jalová složka proudu značně převyšuje činnou složku, účinník je proto velmi malý, dosahuje hodnoty cca 0,1. Tento stav odpovídá dosti přesně stavu naprázdno transformátoru.

2.2.3. AS motor ve stavu jako generátor

Asynchronní motor aby mohl pracovat, jako generátor musí splňovat tyto předpoklady:

- Otáčky generátoru se zvýší přidavným poháněcím zařízením nad otáčky synchronní
- Generátor musí pracovat paralelně se zdrojem jalového výkonu potřebného pro vybuzení magnetického pole v motoru.

Tento stav se využívá velice zřídka. Ale je běžný u zdvihacích zařízení. Výhodou asynchronního generátoru je jeho jednoduchost, můžeme ho připojit na síť přímo a roztočí se přidavným zařízením nad synchronní otáčky. Může také samostatně pracovat do sítě, pokud bude zajištěno jeho buzení a to speciálními budiči, nebo vlastním buzením zbytkovým polem rotoru za pomoci kondenzátorů připojených ke statoru, aby se nabudil, musí motor mít zbytkový magnetismus. [3],[5],[6].

2.3. Momentová charakteristika

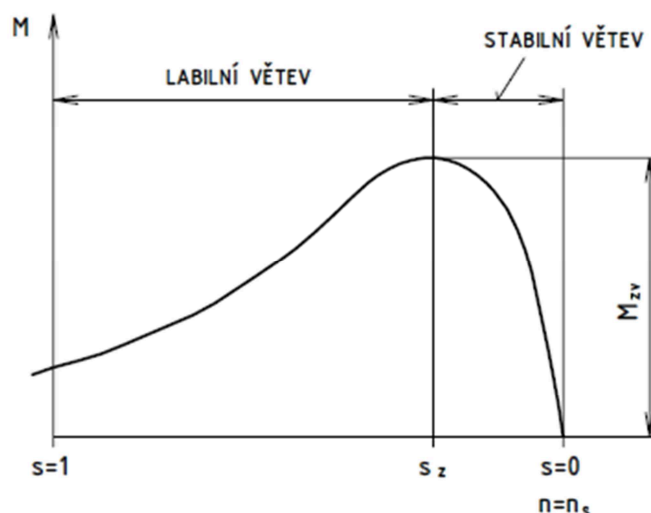
Momentová charakteristika nám udává závislost momentu na otáčkách, nebo na skluzu. Moment motoru určíme za pomoci mechanického výkonu:

$$M = \frac{P'}{\omega} = \frac{P'}{\omega_1 \cdot (1 - s)} \quad (2.3)$$

Po úpravách získáme Klossův vztah:

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_{zv}} + \frac{s_{zv}}{s}} \quad (2.4)$$

Momentová charakteristika má dvě větve a to stabilní a labilní. Stabilní část charakteristiky se nachází v levé části charakteristiky, kdy otáčky motoru rostou a roste i hodnota momentu. V pravé části charakteristiky od skluзу zvratu se nachází stabilní větev.



Obrázek 3. Momentová charakteristika AS motoru

2.4. Indukované napětí a proud

Z fyzikálních principů vyplývá, že velikost rotorového proudu i napětí závisí na velikosti rozdílu otáček točivého magnetického pole statoru a otáček rotoru tedy na skluzu. Indukované napětí ve statoru se vypočte dle vzorce (2-5).

$$U = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \phi \quad (2.5)$$

Tento vzorec můžeme uplatnit i pro výpočet indukovaného napětí na rotoru za podmínky, že rotor je vinutý a má rozpojené vinutí. Tedy rotor je v klidu neotáčí se a frekvence statoru je rovna frekvenci rotoru. A rotorové napětí je maximální. Pokud je motor naprázdno otáčky rotoru se blíží synchronním otáčkám je rotorové napětí nulové.

Při jakýchkoliv otáčkách rotoru asynchronního motoru můžeme požit vzorec pro výpočet indukovaného napětí tento:

$$U_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi = 4,44 \cdot s \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi \quad (2.6)$$

Tedy

$$U_2 = s \cdot U_{20} \quad (2.7)$$

V rotoru pak může protékat proud daný rovnicí (2-8), z které vyplývá, že asynchronní motor při jakýchkoliv otáčkách podobá transformátoru, který je na sekundární straně zatížen.

$$I_2 = \frac{U_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \quad (2.8)$$

2.5. Magnetomotorické napětí

Připojíme-li na statorové vinutí napětí, začne statorem protékat elektrický proud, tento proud vytvoří magnetomotorické napětí, které značíme F_{m1} a znázorňujeme jako vektor otáčející se v prostoru s úhlovou rychlostí danou vzorcem

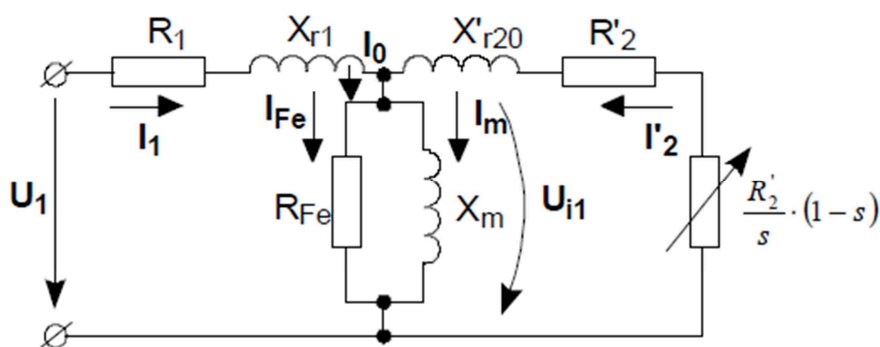
$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \frac{1}{p} \quad (2.9)$$

Rotorovým vinutím začne protékat elektrický proud, který vyvolá magnetomotorické napětí rotoru. Toto magnetomotorické napětí rovněž znázorňujeme jako vektor F_{m2} , který se otáčí úhlovou rychlostí

$$\omega_2 = \omega_1 \cdot s \quad (2.10)$$

2.6. Náhradní schéma jedné fáze třífázového asynchronního motoru

Při rozboru asynchronního motoru se využívá náhradní schéma, které umožňují stanovit a vysvětlit zákonitosti mezi jednotlivými veličinami představující jednotlivé stavy asynchronního motoru. Společný magnetický obvod mají podobně jako u transformátoru obě vinutí (statorové a rotorové) a každé vinutí má činný odpor a vlastní a rozptylovou indukčnost. Veličiny rotoru jsou přepočteny na počet závitů vinutí statoru, abychom mohli použít stejný obvodový model jako na obrázku č. 4.[5],[6].



Obrázek 4. Náhradní schéma AS motoru

2.7. Výkonová bilance asynchronního motoru

Z napájecí sítě asynchronní motor odebírá činný výkon daný vzorcem:

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad (2.11)$$

V primárním vinutí jsou vzniklé ztráty dány vztahem 2-12.

$$\Delta P_{cu1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (2.12)$$

Ztráty vznikající v železe vyjádříme pomocí vztahu:

$$\Delta P_{Fe} = m_1 \cdot \frac{U_1^2}{R_{Fe}} \quad (2.13)$$

Výkon přenesený ze statoru do rotoru nazýváme výkon ve vzduchové mezeře a je dán vzorcem:

$$P_\delta = P_1 - (\Delta P_{cu1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d) \quad (2.14)$$

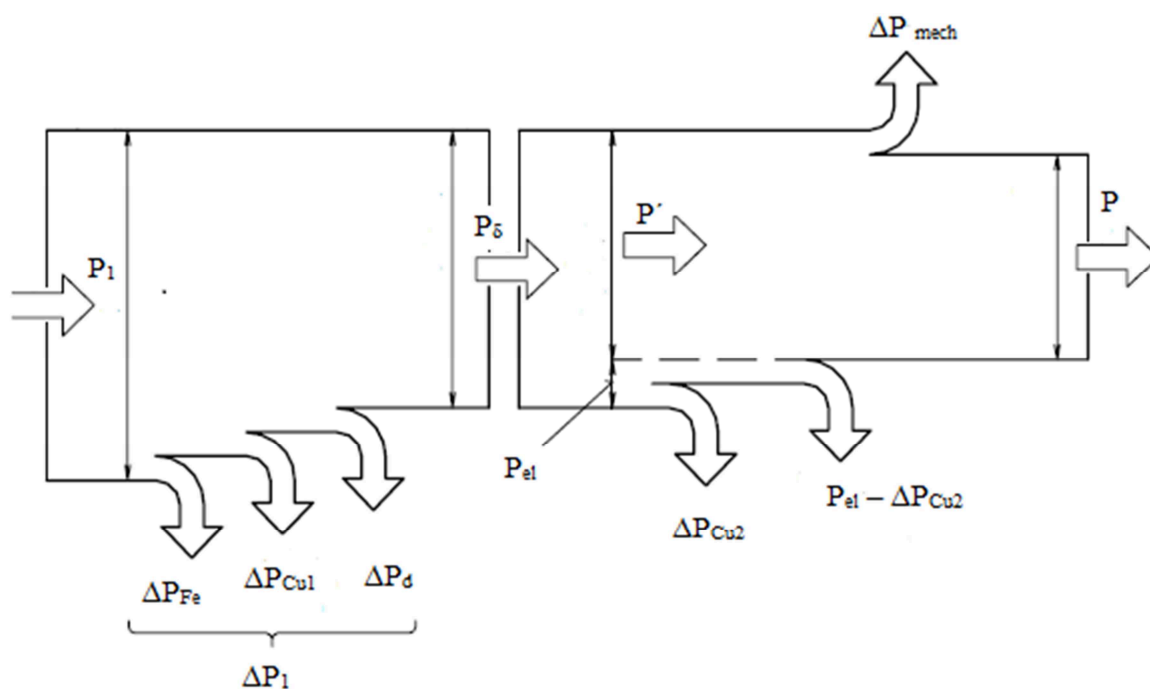
Kde P_d jsou přídatné ztráty ve statoru

Výkonové poměry v asynchronním motoru znázorňuje obr. 5. Výkon ve vzduchové mezeře P_δ se dále dělí na mechanický výkon P' a elektrický výkon P_{el} . Elektrický výkon kryje ztráty ve vinutí rotoru P_{cu2} a dále i výkon předávaný spotřebiči připojenému k rotorovému vinutí, eventuálně vráceného zpět do sítě (pod synchronní kaskáda). Ztráty v železe rotoru jsou malé, a proto je obvykle zanedbáváme. U motorů nakrátko je $P_{el} = P_{cu2}$. Užitečný výkon motoru na hřídeli.

$$P = P' - \Delta P_{mech} \quad (2.15)$$

Kde P_{mech} jsou ztráty dané třením, ventilací a přídatné ztráty v rotoru. Účinnost je pak:

$$\eta = \frac{P}{P_1} \quad (2.16)$$



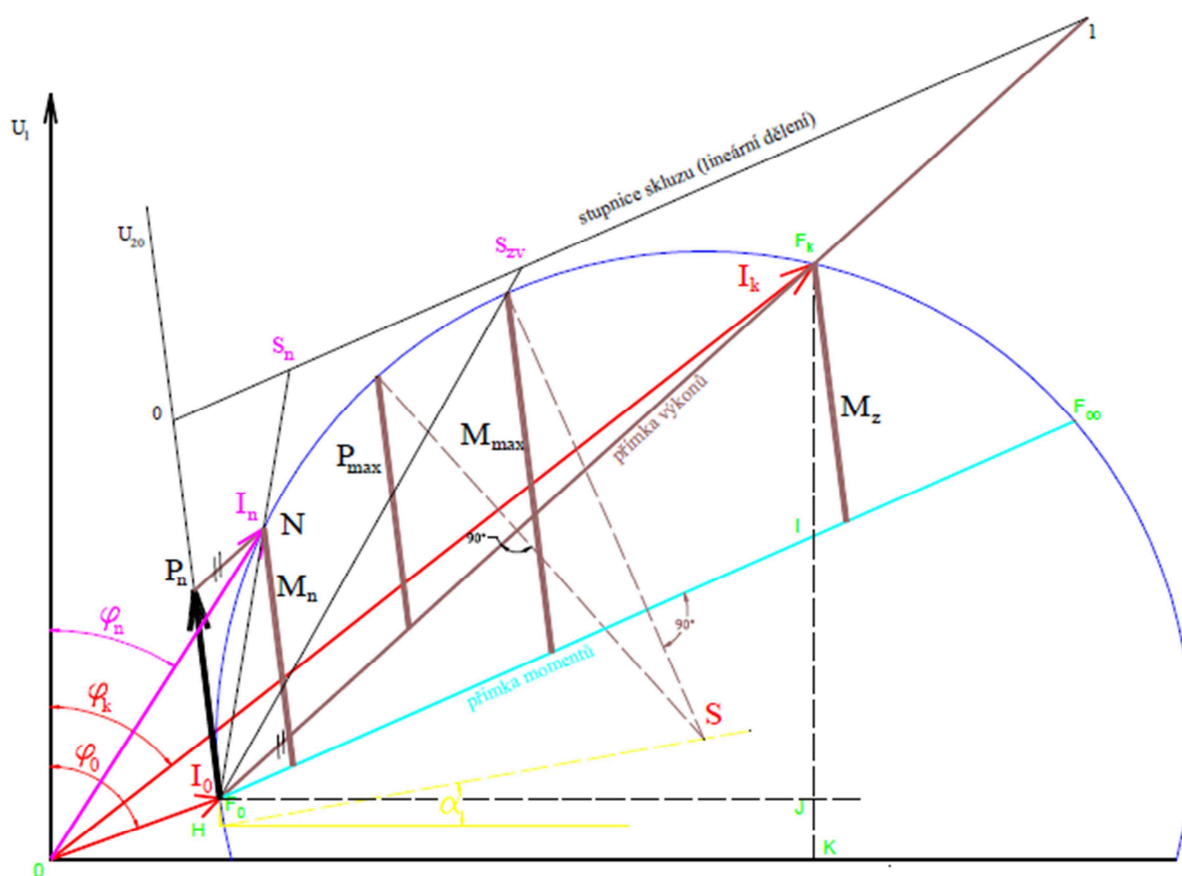
Obrázek 5. Výkonová bilance asynchronního motoru

Popis veličin zobrazených na obrázku č 5.

P_1	Příkon ze sítě
P_δ	Výkon točivého pole
P'	Mechanický výkon
P	Mechanický výkon na hřídeli
ΔP_{mech}	Ztráty mechanické třením a větráním
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe
ΔP_{Cu1}	Ztráty v primárním vinutí v mědi
ΔP_d	Ztráty dodatečné
P_{el}	Elektrický výkon v sekundárním obvodu
ΔP_{Cu2}	Ztráty v sekundárním vinutí mědi
$P_{el} - \Delta P_{Cu2}$	Výkon v sekundárním spotřebiči
ΔP_1	Celkové ztráty primární

2.8. Kruhový diagram asynchronního motoru

Zatížení každého stroje na střídavý proud lze vyjádřit napětím a proudem v hlavním elektrickém obvodu. Stroje nejčastěji pracují při $U = \text{konst.}$, což znamená, že při změnách zatížení stroje se mění pouze efektivní hodnota proudu I a jeho fáze vzhledem k napětí. Při grafickém znázornění uvedeného způsobu zatížení v komplexní rovině se bude konec fázoru proudu pohybovat po křivce „k“ - viz obr. 6, přičemž každému bodu na této křivce bude odpovídat zcela určité zatížení stroje. U asynchronního motoru se zatížení vyjadřuje většinou jako funkce skluzu.



Obrázek 6. Kruhový diagram asynchronního motoru

Motory by se měly používat a provozovat na jmenovitém výkonu, jen tak je zaručena největší možná účinnost stroje. Někdy se však může stát, že jsme nuceni použít motor o větším výkonu, ale tím pádem nám štítkové hodnoty mnoho o provozních hodnotách stroje nepoví. V takovém případě použijeme kruhový diagram. Kruhový diagram je taky potřeba mít k dispozici u velkých strojů, kde není možné provést zatěžovací zkoušku. [3],[5],[6].

2.9. Definice asynchronního motoru

Asynchronní stroje patří mezi nejrozšířenější střídavé elektrické stroje. Tyto stroje mohou pracovat jako motory a přeměňovat tak elektrickou energii na mechanickou nebo jako generátory, které elektrickou energii vyrábějí přeměnou z mechanické energie. Jejich největší uplatnění je ve funkci motorů. Vyrábí se v širokém rozsahu výkonů od desítek W do tisíců kW.



Obrázek 7. Asynchronní motor

2.9.1. Rozdělení asynchronního motoru

Asynchronní motory můžeme rozdělit dle několika kritérií a to:

Podle toku energie:

- Indukční motor
- Indukční generátor
- Indukční brzda

Podle počtu fáze:

- Jednofázové
- Třífázové

Podle konstrukce rotoru:

- Rotor nakrátko
- Kroužkový rotor
- Speciální provedení rotorů

Podle způsobu pohybu motoru:

- Lineární motory (v dnešní době nacházejí čím dál větší uplatnění)
- Rotační pohyb motoru

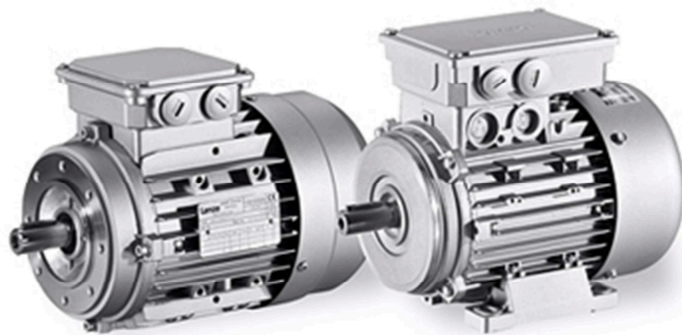
2.10. Základní údaje

2.10.1. Tvar motoru

V praxi se nejčastěji rozlišují asynchronní motory podle způsobu upevnění motoru. Tedy patkový nebo přírubový motor. Tvar motoru se označuje písmeny IM XX, kde IM je mezinárodní označení pro tvar motoru. 1. písmeno nám říká v jaké poloze je hřídel motoru, které může být horizontální **B** nebo vertikální **V**. Poslední údaj je pak číslo které nám udává konstrukční uložení motoru. Patkový je uvedená číslice **3**, nebo přírubový pak **5**. Například **IM B3**.

Dalším způsobem značení je IM x xx x,

- První číslice určuje, zdali jde o motor patkový 1, nebo přírubový 3 (může být i kombinace obou a to patkopřírubový s číslici 2)
- Druhé dvojčíslí určuje způsob montáže
- Poslední číslo určuje provedení konce hřídele



Obrázek 8. Přírubový a patkový AS motor

2.10.2. Chlazení motoru

Základním dělením motoru podle chlazení je motor se závislým chlazením, tedy ventilátor je upevněn přímo na hřídeli motoru. Nebo nezávislé chlazení, kde motor má ventilátor s vlastním pohonem a napájením

Označuje se **IC xxx**. IC je mezinárodní označení pro chlazení motoru a čísla následující za tímto označením udávají bližší specifikaci chlazení motoru, kterou výrobce udává v katalogovém listu motoru. [3],

První číslo určuje uspořádání chladicího okruhu

- 0: Volný okruh
- 1-3 Přívod i odvod tvořen potrubím

- 4 Chlazení povrchu
- 5-8 Tepelné výměny

Druhé číslo určuje způsob proudění primárního chlazení

- Konvekci
- Chlazení vlastní
- Cizí chlazení

Třetí číslo určuje způsob proudění sekundárního chlazení

- 0 Konvekci
- 1 Vlastní chlazení
- 6 Cizí chlazení
- 8 Relativní pohyb

2.10.3. Krytí motoru

Krytí motoru se označuje **IP** stejně jako i u přístrojů a udává nám stupeň krytí proti vniknutí cizích těles a vody.

Stupně ochrany před dotykem nebezpečných částí a před vniknutím cizích pevných těles udávané první číslicí:

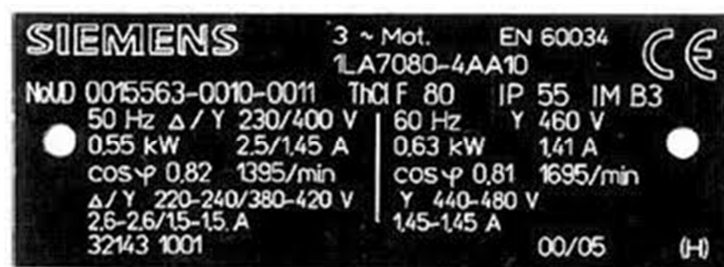
- IP 0x Nechráněno
- IP 1x Zařízení je chráněno před vniknutím pevných cizích těles o průměru 50mm a větších před dotykem hřbetem ruky
- IP 2x Zařízení je chráněno před vniknutím pevných cizích těles o průměru 12,5mm a větších a před dotykem prstem
- IP 3x - Zařízení je chráněno před vniknutím pevných cizích těles o průměru 2,5mm a větších a před dotykem nástrojem.
- IP 4x - Zařízení je chráněno před vniknutím pevných cizích těles o průměru 1mm a větších a před dotykem drátem.
- IP 5x - Zařízení je chráněno před prachem a před dotykem drátem.
- IP 6x - Zařízení je prachotěsné a je chráněno před dotykem drátem.

Stupně ochrany proti vniknutí vody udávané druhou číslicí:

- IP x0 Nechráněno.
- IP x1 - Svisle kapající

- IP x2 - Kapající ve sklonu 15°.
- IP x3 - Kropení, déšť.
- IP x4 – Stříkající
- IP x5 – Tryskající
- IP x6 - Intenzivně tryskající.
- IP x7 - Dočasné ponoření.
- IP x8 - Trvalé ponoření

2.10.4. Štítek motoru



Obrázek 9. Štítek motoru

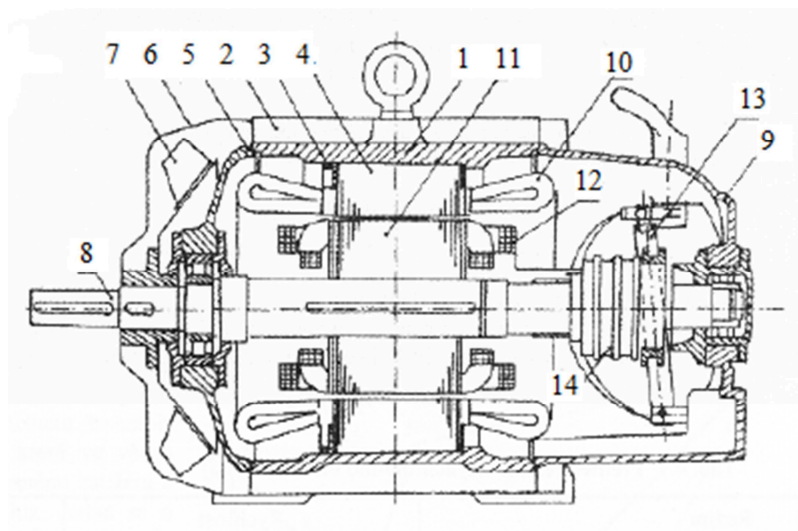
Na štítku motoru jsou uvedeny základní údaje o daném motoru, které jsou nám užitečné při měření nebo odstraňování poruch v provozu.

Na štítku je uvedeno:

- Typ motoru (označení)
- Výrobní číslo
- Krytí IP
- Tvar konstrukce IM
- Základní údaje při frekvenci 50 a 60 Hz
- Druh zapojení (D/Y)
- Napětí
- Proud
- Výkon
- Otáčky za minutu
- Účinník

2.11. Konstrukce

Asynchronní motor se skládá z tří hlavních částí, a to stator, rotoru a magnetický obvod, dále pak



Obrázek 10. Konstrukční části AS motoru kroužkového svorkovnice, ložiska, ventilace a uchycení motoru

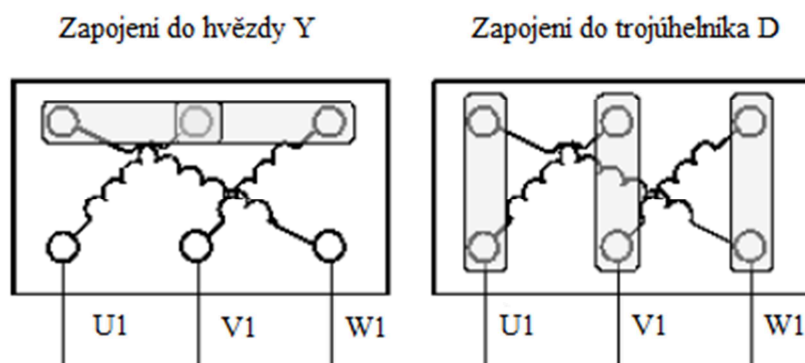
Popis obrázku:

1. kostra
2. žebra
3. zajišťovací žebra
4. statorový magnetický obvod
5. ložiskový štít
6. krýt ventilátoru
7. ventilátor
8. hřídel
9. ložiskový štít
10. statorové vinutí
11. rotorový magnetický obvod
12. rotorové vinutí
13. uhlíky
14. kroužky

2.9.2. Stator

Je tvořen elektrotechnickými plechy na sebe tvořící dutý válec. V dutině válce jsou po celé délce drážky, v nichž je uloženo trojfázové měděné izolované vinutí posunuto o 120° . Začátky i konce vinutí

jsou vyvedeny na svorkovnici, kde se spojují do hvězdy D, nebo trojúhelníku Y. Značeny jsou písmeny U, V, W s indexy 1 nebo 2, které označují začátek vinutí 1 a konec vinutí 2.



Obrázek 11. Zapojení satorového vinutí na napájení

2.9.3. Rotor

Je to rotující část motoru, která je tvořena elektrotechnickými plechy skládanými na sebe tvořící válec. Na vnějším obvodu válce jsou drážky. Drážky mohou mít tvar podle typu klece (odporová nebo vírová). Vinutí v drážkách je provedeno dvojím způsobem:

- **Kotva nakrátko** (klecové vinutí) – v tomto provedení je vinutí vstříknuto do drážek rotoru a konce jsou spojeny kruhy nakrátko - tvoří klec. Materiál používaný v tomto provedení je měď, ale nejčastěji hliník. Kruhy, které spojují vinutí nakrátko, bývají i s chladicími lopatky, ty jsou vidět na obrázku č. 4.



Obrázek 12. Rotorová klec nakrátko

- **Kroužkový rotor** - v drážkách rotoru je uloženo třífázové měděné izolované vinutí posunuto o 120°. Začátky vinutí jsou spojeny do hvězdy a konce vinutí jsou vyvedeny ke kroužkům na hřídeli. Ke kroužkům dosedají uhlíkové kartáče, které tvoří kontakt mezi rotující a statickou částí. Od uhlíků jsou vedeny vodiče do svorkovnice. Ke kroužkům se připojují odpory sloužící pro spouštění motoru.

2.9.4. Magnetický obvod

Střídavé magnetické obvody jsou vždy skládány z jednotlivých navzájem elektricky odizolovaných plechů s dobrými magnetickými vlastnostmi. Těch se dosahuje u tzv. křemíkové oceli, vyráběné výhradně pro elektrotechniku. Křemík přidaný do nízkouhlíkové oceli způsobí významné zvýšení elektrického odporu oceli, zvýšení permeability a chemicky na sebe váže i kyslík – druhý nejškodlivěji (po uhlíku) působící prvek. Zvýšení rezistivity oceli znamená potlačení ztrát vířivými proudy a tedy snížení celkových střídavých magnetických ztrát. Největší rezistivitu má křemíková ocel při obsahu 11 % Si. Tato ocel je však velice křehká a tvrdá a je pro výrobu nepoužitelná. V praxi se používají plechy s obsahem křemíku 0,3 až 4,6 %. Magnetická kvalita a praktická využitelnost křemíkové elektrotechnické oceli závisí na obsahu křemíku, tloušťce plechu (nejčastěji 0,5 a 0,35 mm) a na technologii jeho výroby. Tato ocel se vyrábí válcováním zatepla nebo zastudena ve tvaru tabulí nebo pásů. Podle technologie výroby ji lze rozdělit do těchto třech skupin: [6].

- válcovaná zatepla, která je izotropní z hlediska magnetických vlastností,
- válcovaná zastudena se slabou anizotropií,
- válcovaná zastudena s krystalografickou texturou a výraznou anizotropií.

2.9.5. Ložiska

Jsou nejporuchovější části elektromotoru. Dochází k opotřebením zadření ložisek a uvedení motoru do stavu nakrátko, kdy po uplynutí určité doby dojde k tepelnému poškození izolace vinutí a ke zkratu, pokud nevybaví ochrana. Ale i tak dojde k tepelnému poškození izolace vinutí.

Používají se různé velikosti a druhy krytí ložisek. Moou být nekryté, ty vyžadují pravidelné mazání v určitých cyklech, které uvádí u daného motoru výrobce. Dále pak jsou ložiska kryté z jedné strany, rovněž vyžadují pravidelné mazání ložisek, ale v déle trvajícím cyklu, než je tomu u ložisek nekrytých. Poslední skupinou jsou ložiska kryté z obou stran, nevyžadují pravidelné mazání.



Obrázek 13. Ložisko

2.9.6. Kostra motoru

Kostra motoru je tvořena buď litinou, nebo hliníkem. Kostra je spojena s mechanismem pro upevnění motoru a to je provedeno buď za pomoci patek, které mohou být lité společně s kostrou a jsou nerozebíratelné (při ulomení patek je motor znehodnocený nelze ho dál používat i když je plně funkční) nebo vyměnitelné patky (praktičtější z důvodu delšího využití motoru při ulomení patek se vymění a může se používat nadále. Dále pak konstrukce má žebrování, které zlepšuje odvod tepla motoru a zvýší jeho životnost.

2.9.7. Ventilace motoru

Ventilace motorů je provedena několika způsoby. Jednou z nich je pomocí plastové vrtule upevněné na hřídeli motoru zobrazené na obrázku 11a, jedná se o vlastní ventilaci. Některé motory mají na rotorové kleci lopatky, které rovněž slouží k chlazení motoru. Dalším způsobem může být cizí chlazení zobrazeno na obrázku 11c.



Obrázek 14a.-Chlazení na rotoru, b.-vlastní chlazení, c.-cizí chlazení

2.9.8. Vinutí

Vinutí statoru může být tvořeno soustřednými nebo stejnými cívkami. U soustředných cívek nedochází ke křížení vodičů na čelech vinutí, jak je tomu u vinutí se stejnými cívkami. U trojfázových motorů jsou drážky vyplněny cívkami pro každou fázi. U jednofázového asynchronního motoru jsou statorové drážky z 2/3 vyplněny vodiči hlavního vinutí, zbylá 1/3 je určena pro vyplnění vodiči rozběhového vinutí motoru.

Zvětšením odporu rotorového vinutí po dobu rozběhu dochází ke zlepšení rozběhových charakteristik. Toho lze dosáhnout zapojením spouštěcího odporníku do obvodu rotoru a tím zvětšíme jeho odpor. Pomocí tohoto způsobu lze docílit potřebného průběhu rozběhového proudu a momentu. Toto řešení nese sebou vyšší nároky a zvyšuje riziko poruchovosti. Pokud není zapotřebí kroužkových motorů lze použít asynchronní motory s kotvou nakrátko, které se regulují skrze měniče frekvence.

2.12. Druhy klecových vinutí

2.10.1. Vírové klece

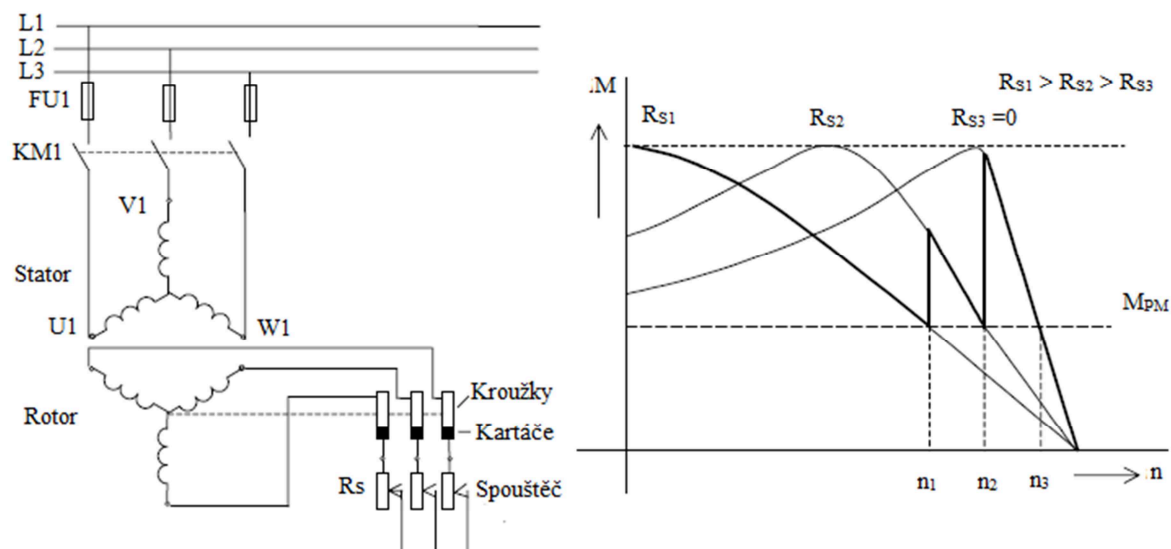
Vírovou klecí nazýváme vinutí s relativně úzkými a vysokými vodiči obdélníkového či lichoběžníkovitého průřezu. Důvod, proč se tato konstrukce používá, spočívá v tom, že v první fázi rozběhu, při které se rotorová frekvence f_2 blíží hodnotě frekvence statorového vinutí f_1 , dochází ke vzniku značných vířivých proudů v tyčích rotoru. Tyto proudy jsou vyvolané rozptylovým polem, které prochází drážkami rotoru. Vířivé proudy se skládají s rotorovým proudem. To má za následek rozdělení proudové hustoty v rotorové tyči. V první části tyče, se soustřeďuje proud. Velikost elektrických ztrát podstatně naroste. Tomu odpovídá zařazení dodatečných odporů do obvodu rotoru. Na velikost reaktance má vliv změna rozdělení proudové hustoty. Frekvence v rotoru se při rozběhu postupně zmenšuje, a tudíž dochází ke zmenšení vířivých proudů a nerovnoměrného rozložení proudu v rotorové tyči. Kmitočet má malou hodnotu a proudová hustota je rozložena rovnoměrně při jmenovitém zatížení asynchronního motoru.

2.10.2. Dvojité klece

Klecové vinutí s dvěma soustavami rotorových tyčí se nazývá dvojitá klec. Vnější klec je tvořena tyčemi kruhového průřezu z normální nebo legované mosazi. Tento materiál má zvětšený měrný odpor. Vnitřní klec je vyrobena z měděných kruhových nebo obdélníkových tyčí. Z mědi jsou také vyrobeny kruhy nakrátko. Při první fázi rozběhu, kdy frekvence f_1 přibližně odpovídá f_2 je reaktance vnitřní klece výrazně větší než vnější klece. Z tohoto důvodu protéká rotorový proud převážně vnější klecí s velkým odporem, což způsobuje snížení záběrného proudu a zvýšení záběrného momentu. Rotorová frekvence se při rozběhu zmenšuje a proud rotoru přebírá ve větší míře klec vnitřní. Reaktance klecí je relativně velice malá při malých skluzech. Proud v klecích se rozděluje nepřímo úměrně jejich odporům. Vnitřní klecí protéká převážná část proudu, protože její tyče jsou většího průřezu a jsou vyrobeny z materiálu o menším měrném odporu. [7].

2.13. Rozběh as motoru kroužkového

Asynchronní motor kroužkový se spouští pomocí odporů, řazením do obvodu rotoru. Při spouštění odporem se postupně vyřazují jednotlivé odpory, až se vinutí rotoru spojí nakrátko.



Obrázek 15. Odporový spouštěč a momentová charakteristika s jednotlivými zařazenými odpory.

Spojení vinutí se provádí za pomoci stykačů. V tomto případě stykači vzduchového provedení typu VH 240. Používá se čtyř rychlostních stupňů. Přitom Poslední tři stupně vyřazují odpory z obvodu, až rotor je ve stavu nakrátko.



Obrázek 16. Stykač VH 240 zapojený v obvodu ovládání zdvihu jeřábu.

Zařazováním těchto odporů do rotorového obvodu se v momentové charakteristice asynchronního motoru posouvá skluz zvratu, ten se mění přímo směřně s odporem zařazeným v obvodu rotoru. Tím pádem můžeme zvětšovat záběrný moment motoru až do velikosti momentu zvratu, tedy do maximálního momentu motoru. Zároveň se záběrný proud motorů zařazováním odporů do rotorů zmenšuje.

2.14. Odporníky

Popis konstrukce

Pro řízení rychlosti kroužkových motorů se používají stavebnicové odporníky typu SOV, SOP, SOC, který vyrábí MEZ Postřelmov, a.s. Tyto přístroje využívají přirozeného ochlazování. Jednotlivé odporové bloky se skládají v jeden celek. [13], [14].

Provedení

- SOV – Provedení drátovými články (válečky)
- SOP – Provedení plechovými články
- SOC – Provedení drátovými články
- SOU – Provedení litinovými články

Zapojení článků je znázorněno na obrázku č. 17 je to odporník typu SOU používán pro zdvih jeřábu.



Obrázek 17. Odporník typ SOU pro zdvih jeřábů.

3. Specifika návrhu zdvihového jeřábového motoru

3.1. Definice jeřábu

Jeřáb je stroj, který je určen pro přemísťování břemena, zvedání, pojíždění, otáčení, nebo změnou vyložení, nejčastěji spojením několika z těchto pohybů. Přičemž, každý s těchto pohybů musí být samostatně prováděn, jinak je to porušení pravidel bezpečnosti. [8], [9].

3.2. Parametry a dělení jeřábů

Nejdůležitější parametr jeřábu je **nosnost**, která je udávána hodnota v kg (nebo v tunách) udává největší dovolenou hmotnost břemene (například zavěšeného na háku, přičemž hák nebo traverza s háky se také do této hodnoty započítá).

Další parametry: pracovní rychlosti, rozměry pracovního pole, výška zdvihu

3.1.1. Dělení jeřábů podle skupin zařazení:

- | | |
|---------------------------|---|
| • 0 - velmi lehký provoz | jeřáby občasně pracující |
| • I - lehký provoz | montážní jeřáby ve strojovnách |
| • II - střední provoz | stavební jeřáby |
| • III - těžký provoz | dílenské jeřáby od 5t |
| • IV - velmi těžký provoz | sázecí jeřáby, u hlubinných pecí, kovací jeřáby |

3.1.2. Další možné dělení:

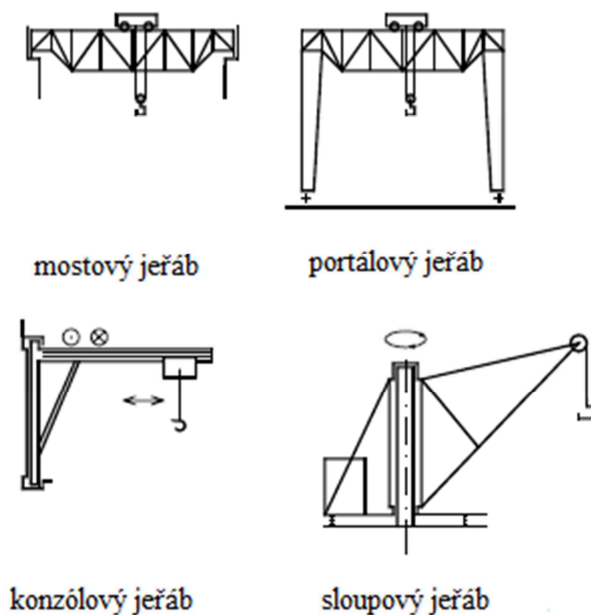
- Podle druhu pohybu: stabilní, pojízdné, otočné, pojízdné a otočné
- Podle druhu pohonu: ruční, elektrické, se spalovacím motorem apod.
- Podle vnějšího tvaru: mostové, portálové a polo portálové, konzolové, otočné (sloupové a věžové), kabelové, plovoucí (pontonové).
- Podle pracoviště: ve strojovnách, dílenské, nádvorní, přístavní, v loděnicích, stavební, hutní apod.

3.1.3. Ocelové konstrukce (nosníky) jeřábu mohou být:

- příhradové svařené s tvarové oceli nebo trubek (nejlehčí)
- plnostěnné svařeno ze stojiny a dvou pásnic
- skříňové svařeno ze dvou stojin a dvou pásnic, tuhost dobrá [8], [9].

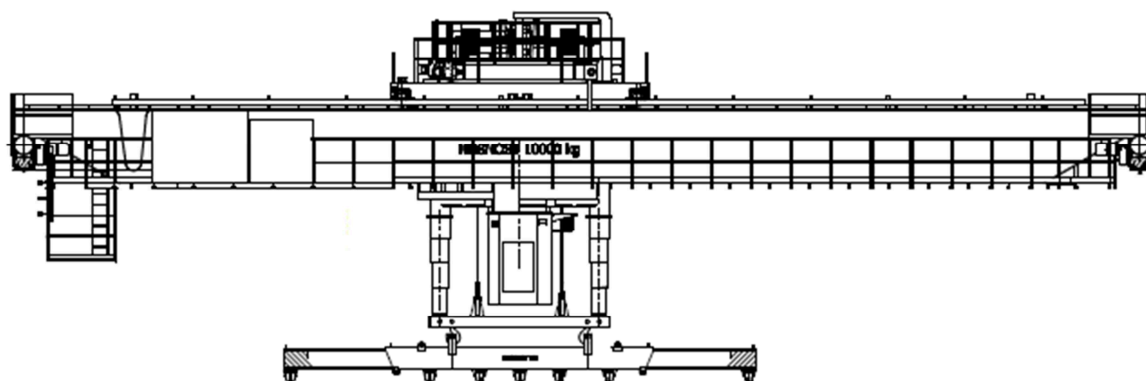
3.1.4. Druhy jeřábů:

- Mostový jeřáb
- Portálový jeřáb
- Konzolový jeřáb
- Sloupový jeřáb
- Věžový jeřáb
- Třínožkový jeřáb
- Kabelový jeřáb



Obrázek 18. Vybrané typy provedení jeřábů

Tato diplomová práce se zabývá modernizací pohonů zdvihu mostového jeřábu s teleskopy. Níže je na obrázku č. 19. Bližší konstrukční uspořádání.



Obrázek 19. Mostový jeřáb z teleskopy a traverzou

3.1.5. Jeřábová kočka

Jeřábová kočka pojíždí po visuté dráze mostu jeřábu. Jeřábovou kočku tvoří tři hlavní části. Jsou to:

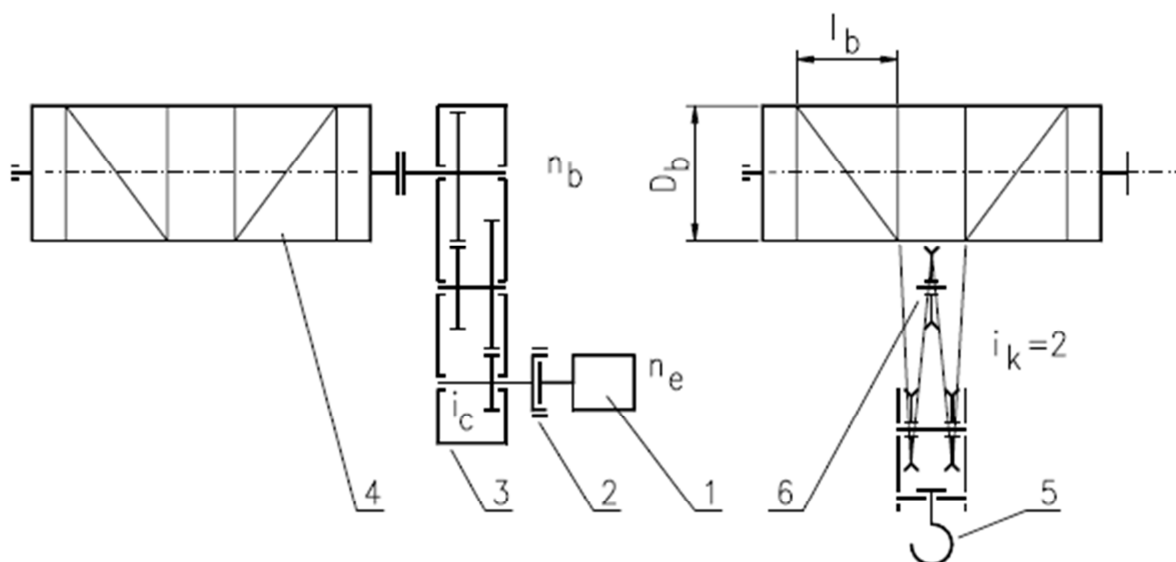
- rám kočky
- pojezdové ústrojí kočky
- zdvihací zařízení kočky

3.3. Zdvihací zařízení kočky

Zdvihací zařízení kočky nám umožňuje zdvih a spouštění břemena. Rychlost zdvihu této kočky je se udává v m/min. Hlavní části zdvihacího ústrojí jsou:

- motor zdvihu (1)
- spojka brzdy a motoru (2)
- brzda zdvihu (2)
- převodovka zdvihu (3)
- spojka bubnu a převodovky
- lanový buben (4)
- lano (6)
- blok kladnice (5)

Kladnice je s pevnou kladnou a lanovým bubnem spojena lany. Při manipulaci s břemenem o hmotnosti m_Q na kladnici o pasivní hmotnosti m_k se břemeno zvedá rychlostí v_z . Pokud se břemeno zastaví, je uvedena v činnost spojka s brzdou (brzda, většinou dvoučelist'ová je většinou ovládána elektrohydraulickým odbrzd'ovačem). Lanový buben je pro menší zdvihy hladký, lano se na něj navíjí těsně vedle sebe (otěr, menší délka bubnu) nebo je buben opatřen drážkou pro vedení lana (dobrá životnost, delší buben). [8], [9], [10],



Obrázek 20. Zvedací ústrojí kočky jeřábu

3.4. Určení výkonu motoru zdvihu

Je zapotřebí uvažovat účinnost jedné kladky $\eta = 95\%$, pak třeba určit účinnost celého kladkostroje η_{kl} tedy:

$$\eta_{kl} = 0,5 \cdot (1 + \eta) = 0,5 \cdot (1 + 0,91) \Rightarrow 9,6 \quad (3.1)$$

Lanový neboli kladkový převod:

$$i_l = \frac{n}{z} = \frac{2}{1} = 2 \quad (3.2)$$

$n = 2$ – počet lan zdvihu

z = počet navíjených lan kladkového převodu, tedy počet navíjených konců lan

V našem případě visí kladnice s traverzou na počtu lan $N = 4$. (Může být i kombinace s lichým počtem lan, pak je vyrovnávací kladka na kladnici a na kočce je pak soustava pevných kladek.)

Maximální síla v laně je dána vztahem 3-18, tím se učí i průřez ocelového lana.

$$F_L = \frac{Q_c \cdot g}{z \cdot i_L \cdot \eta_{kl}} \quad (3.3)$$

Výsledný výkon motoru pro nejvyšší rychlost zdvihu je dán výpočtem:

$$P_1 = \frac{P_0}{\eta_B \cdot \eta_p} \quad (3.4)$$

Určení motoru asynchronního s vinutým rotorem pro zdvih jeřábu je třeba brát ohled na druh zatížení.

Dále je třeba brát v úvahu změny směru otáčení tedy reverzaci motoru, což zapříčiní dřívější oteplení motoru a přehřátí.

Při změně smyslu otáčení se může motor dostat do stavu, kdy se bude otáčet jedním směrem a operátor zdvihu dá opačný směr, tudíž rotor se otáčí jedním směrem a točivé magnetické pole statoru opačným. Vznikne krátkodobý nárůst proudu nad jmenovitou hodnotu. [8], [9], [10],

3.5. Parametry zdvihu jeřábů

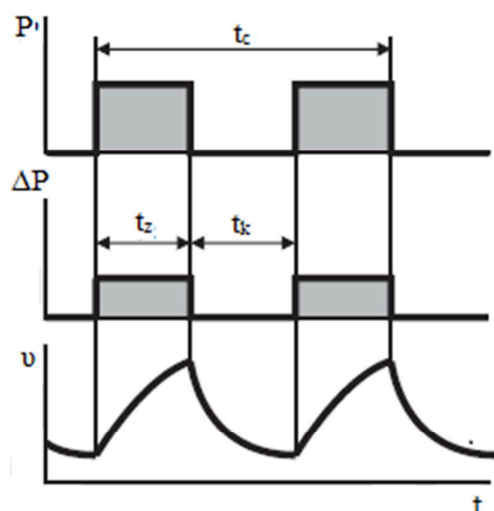
3.5.1. Určení druhu zatížení

Přerušovaným zatížením se rozumí průběh zatížení složený ze stejných cyklů sestavených z doby konstantního zatížení a doby klidu, které jsou dostatečně krátké, takže se nedosáhne ustálené teploty během jednoho cyklu. Pro druh zatížení S3 se předpokládá, že ztráty za rozběhu jsou zanedbatelné a v podstatě neovlivní oteplení motoru. V katalogu výrobců motorů je uveden přerušovaný chod s dobou cyklu 10 minut a zatěžovateli 25%, 40%, 60%, 100%.

Zatěžovatel je definován jako poměr doby zatížení k době pracovního cyklu vyjádřený v procentech.

$$\text{zatěžovatel} = t_z / t_c \cdot 100 [\%]$$

- doba jednoho cyklu $t_c = t_k + t_z$
- doba klidu
- doba zatížení



Obrázek 21. Průběhy oteplení zatížení S3

3.5.2. Normalizovaný druh zatížení

Jmenovitý výkon motoru pro druhy zatížení S3 je definován jako výkon, který může motor dát v oblasti trvalého zatížení během cyklu (tz). Definice výkonu zahrnuje normalizaci následujících parametrů pohonu:

- rozběhové třídy 150,300,600
- zatěžovatele 25%, 40%, 60%, 100%
- přídatné momenty setrvačnosti redukované na hřídel motoru

3.6. Parametry zdvihu jeřábů

Tabulka 1. Parametry pohonu zdvihu jeřábu

Parametry pohonu zdvihu	
Typ motoru	HRP 1142 S3
P (kW) 40% zatěžovatel	60
Proud stator/rotor (A)	124/114
P (kW) 25% zatěžovatel	70
Proud stator/rotor (A)	139/134
P (kW) 60% zatěžovatel	53
Proud stator/rotor (A)	109/102
Napětí statoru (V)	380
Napětí rotoru (V)	329
Otáčky motoru (ot/min)	725
cosφ (-)	0,81
Odpor vinutí rotoru (Ω)	0,032
Převodovka a buben	
Převodový poměr převodovky (-)	1/43,7
Rychlost zdvihu (m/min)	16,4
Poloměr bubnu (mm)	630

3.6.1. Otáčky lanového bubnu zdvihu jeřábu

Otáčky lanového bubnu určíme s převodového poměru převodovky a rychlosti otáček daného motoru v maximu tudíž ve jmenovitých otáčkách motoru vzorcem:

$$n_{bub} = i_{poh} \cdot n_{hři} = \frac{1}{43,7} \cdot 725 = 16,57 \text{ ot/min} \quad (3.5)$$

3.6.2. Rychlost zdvihu břemene

Rychlost zdvihu určíme pomocí otáček bubnu jeho poloměru, nesmíme zapomenout, že traverza jeřábu je upevněna na kladkostroji tudíž rychlost zdvihu musíme podělit 2, abychom dostali reálný výsledek.

$$o_{bub} = \pi \cdot d = \pi \cdot 630 = 1979 \text{ mm} \quad (3.6)$$

$$v_{zdv} = \frac{o_{bub} \cdot n_{bub}}{2} = \frac{1,979 \cdot 16,57}{2} \Rightarrow 16,4 \text{ m/min} \quad (3.7)$$

$$v_{zdv} = 0,27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.8)$$

3.6.3. Určení výkonu motoru

Lanový neboli, kladkový převod:

$$i_l = \frac{n}{z} = \frac{2}{1} = 2 \quad (3.9)$$

$n = 2$ – počet lan zdvihu

z = počet navíjených lan kladkového převodu, tedy počet navíjených konců lan

Celková zatížitelnost:

$$Q_c = Q + G = 10000 + 8000 = 18\,000 \text{ kg} \quad (3.10)$$

Q = nosnost jeřábu

G = hmotnost stálého břemene (hmotnost teleskopu, traverzy, kladek, háku a hmotnostní rezerva). Dle ČSN 27 0100 se hmotnost lana neuvažuje do výšky zdvihu 20m.

Zatížení lana

$$F_L = \frac{Q_c \cdot g}{z \cdot i_l \cdot \eta_L} = \frac{18\,000 \cdot 9,81}{1 \cdot 2 \cdot 0,95 \cdot 2} = 46\,468,4 \text{ N} \quad (3.11)$$

Moment na bubnu:

$$M_b = 2 \cdot F_L \cdot \frac{D_B}{2} = 2 \cdot 46\,468,4 \cdot \frac{0,63}{2} = 29\,275,092 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.12)$$

Výkon bubnu:

$$P_0 = M_B \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{bub} = 29\,275,092 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,273 = 50\,215,8 \text{ W} \quad (3.13)$$

Výkon motor:

$$P_1 = \frac{P_0}{\eta_B \cdot \eta_p} = \frac{50\,215,8}{0,96 \cdot 0,95} = 55\,061 \text{ kW} \quad (3.14)$$

4. Proved'te návrh jeřábového 3f asynchronního motoru zvoleného výkonu

4.1. Volba hlavních rozměrů

Výšku osy si zvolíme 280 mm, a dále určíme vnější průměr statorových plechů podle tabulky č. 2.

Tabulka 2. Vnější průměry statorových plechů v závislosti na osově výšce.

h (mm)	56	63	71	80	90	100	112	132
De (m)	0,89	0,1	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225
h (mm)	160	180	200	225	250	280	315	355
De (m)	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,530	0,590	0,660

$$D_e = 0,530 \text{ m}$$

Vnitřní průměr statoru, kde z tabulky č. 3. jsme určili činitel $K_D = 0,74$.

Tabulka 3. Činitel K_D pro různé počty pólů.

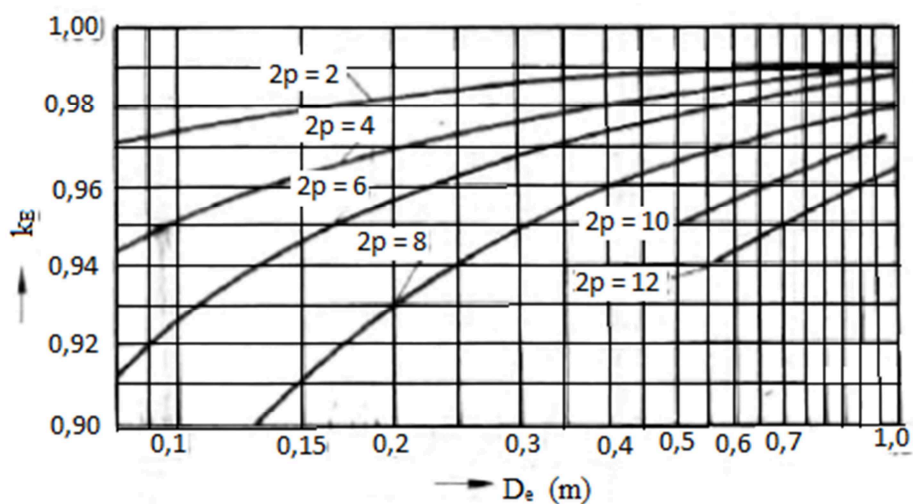
2p	2	4	6	8	10 až 12
K_D	0,52 až 0,57	0,62 až 0,68	0,70 až 0,72	0,74 až 0,75	0,75 až 0,77

$$D = k_D \cdot D_e = 0,74 \cdot 0,530 = 0,392 \text{ m} \quad (4.1)$$

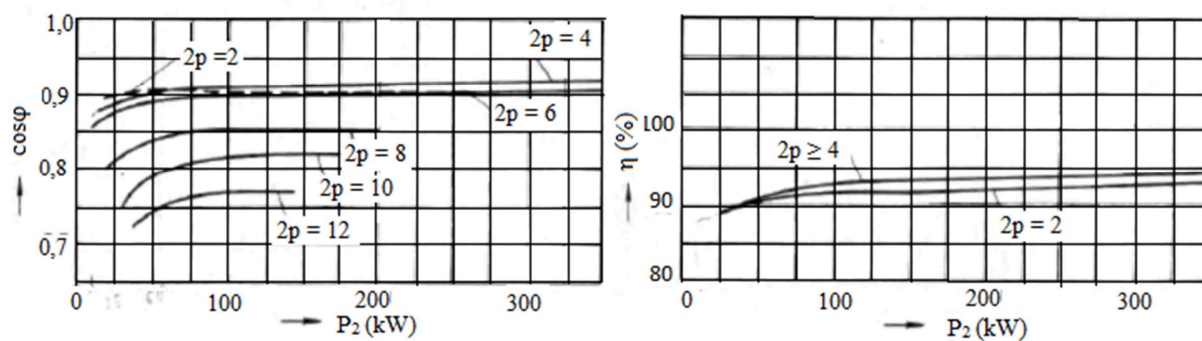
Pólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,392}{8} = 0,154 \text{ m} \quad (4.2)$$

Vnitřní elektromagnetický výkon určíme, koeficienty $k_E = 0,97$ určíme z obrázku č. 22 a předpokládaný účinník a účinnost z obrázku č. 22 $\eta = 0,91$, $\cos \varphi = 0,81$.



Obrázek 22. Závislost D_e na k_E



Obrázek 23. Hodnoty účinníku a účinnosti AS motoru

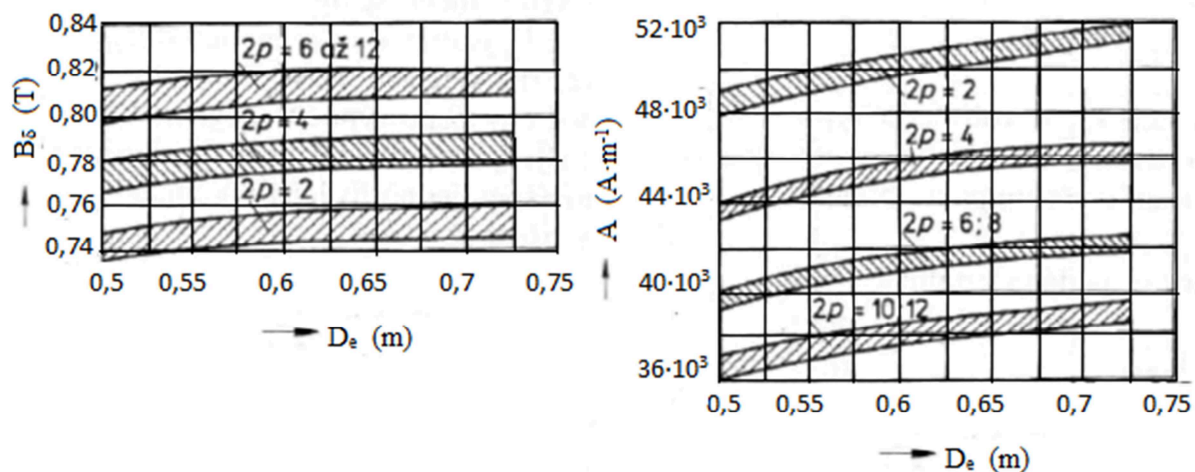
$$P_i = P \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 60 \cdot \frac{0,97}{0,91 \cdot 0,81} = 79 \text{ kW} \quad (4.3)$$

Stanovení délky vzduchové mezery:

$$l_i = \frac{P_i}{D^2 \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot A \cdot B_\delta} = \frac{79}{0,392^2 \cdot 78,5 \cdot 1,11 \cdot 0,92 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,81} = 0,198 \text{ m} \quad (4.4)$$

Příčemž z obrázku č. 24 určíme proudovou hustotu $A = 44 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ a indukci ve vzduchové mezeře $B_\delta = 0,8 \text{ T}$, poté určíme výpočtem i úhlovou rychlost:

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{p} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{50}{4} = 78,5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.5)$$



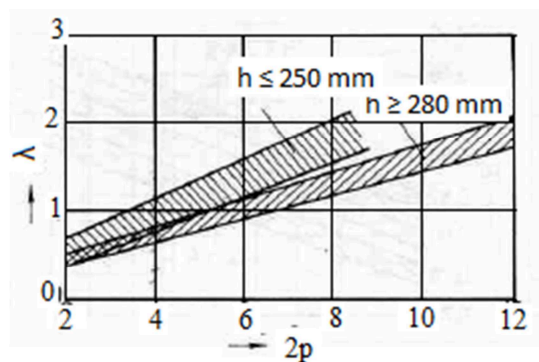
Obrázek 24. Lineární hustota proudu a magnetické indukce ve vzduchové mezeře AS

Předběžný činitel vinutí $k_{v1} = 0,92$

Štíhlostní poměr:

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} = \frac{0,1974}{0,154} = 1,28 \quad (4.6)$$

Štíhlostní poměr vyhovuje, a proto můžeme dané rozměry určit jako konečné.



Obrázek 25. Štíhlostní poměr

4.2. Návrh drážek satorového vinutí

Určíme minimální a maximální počet satorových drážek a z tabulky č. určíme drážkovou rozteč t_{d1} :

$$Q_{1min} \text{ až } Q_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{d1max}} \text{ až } \frac{\pi \cdot D}{t_{d1min}} = \frac{\pi \cdot 0,392}{0,017} \text{ až } \frac{\pi \cdot 0,392}{0,022} = 72,4 \text{ až } 56 \quad (4.7)$$

Zvolíme $Q_1 = 72$ a počet drážek na pól je:

$$q_1 = \frac{Q_1}{2p \cdot m} = \frac{72}{8 \cdot 3} = 3 \quad (4.8)$$

Drážková rozteč:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,392}{72} = 0,0171 \text{ m} \quad (4.9)$$

Počet vodičů v jedné drážce:

$$V'_d = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,392 \cdot 40 \cdot 10^3}{123,3 \cdot 72} = 5,5 \quad (4.10)$$

Jmenovitý proud:

$$I_{1Nf} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1Nf} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{60 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,91 \cdot 0,81} = 123,3 \text{ A} \quad (4.11)$$

Skutečný počet vodičů v drážce je dán vztahem:

$$V_d = a \cdot V'_d = 2 \cdot 5,57 = 12 \quad (4.12)$$

Počet závitů v sérii jedné fáze:

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{12 \cdot 72}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 72 \quad (4.13)$$

Skutečná proudová hustota:

$$A = \frac{2 \cdot I_{1N} \cdot N_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 123,3 \cdot 72 \cdot 3}{\pi \cdot 0,392} = 43,3 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4.14)$$

Činitel statorového vinutí, činitel rozlohy pro $q=3$ je $k_{r1} = 0,96$

$$k_{v1} = k_{r1} \cdot k_{y1} = 0,96 \cdot 0,97 = 0,93 \quad (4.15)$$

Činitel kroku se spočte pomocí vztahu:

$$k_{y1} = \sin \frac{\pi}{2} \cdot \beta = \sin \frac{\pi}{2} \cdot 0,889 = 0,97 \quad (4.16)$$

Kde:

$$\beta = \frac{y}{Q_p} = \frac{8}{9} = 0,889 \quad (4.17)$$

Počet drážek na jednu pólovou rozteč:

$$Q_p = \frac{Q_1}{2 \cdot p} = \frac{72}{8} = 9 \quad (4.18)$$

Volíme krok zkráceny na 5/6 pólové rozteče tedy $y = 8$

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot f_1} = \frac{0,97 \cdot 220}{4 \cdot 1,11 \cdot 72 \cdot 0,933 \cdot 50} = 14,31 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (4.19)$$

Skutečná indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_i} = \frac{4 \cdot 14,31 \cdot 10^{-3}}{0,392 \cdot 0,1974} = 0,74 \text{ T} \quad (4.20)$$

Odchylka magnetické indukce je do 5%, vyhovuje.

Průřez efektivního vodiče:

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J_1} = \frac{123,3}{2 \cdot 4,2 \cdot 10^6} = 14,68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (4.21)$$

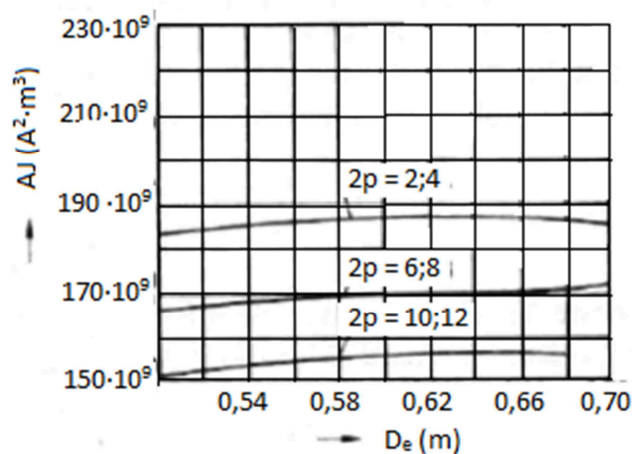
Volený byly dvě paralelní větve, průřez vodiče je tedy:

$$S_{skut} = \frac{S_{ef1}}{2} = \frac{14,68}{2} = 7,34 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (4.22)$$

Hustota proudu:

$$J_1 = \frac{(A \cdot J_1)}{A} = \frac{168 \cdot 10^9}{40 \cdot 10^3} = 4,2 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4.23)$$

Kde podle obrázku č. 26 je $(A \cdot J_1) = 168 \cdot 10^9$



Obrázek 26. Střední hodnota součinitelu AJ

Rozměry zubů a drážek statoru:

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{14,31 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,15 \cdot 0,1974 \cdot 0,95} = 0,033 \text{ m} \quad (4.24)$$

Tabulka 4. Rozměry drážky statoru.

Šířka drážky		Výška drážky	
Izolovaný vodič	2 x 3,55 = 7,1	Jedna vrstva	
Ovinutí tkanicí	4 x 0,2 = 0,8	Izolovaný vodič	6 x 2,24 = 13,44
Drážková izolace	2 x 0,7 = 1,4	Ovinutá tkanicí	2 x 0,2 = 0,4
Vůle	0,2		13,84
		Druhá vrstva	13,84
		Drážková izolace	2 x 0,7 = 1,4
		Vložka mezi vrstvy	0,5
		Podložka pod klín	0,5
		Záporná vůle pod klín	-0,3
			29,78
		Závěr drážky	2,4 + 0,7 = 3,2
Šířka drážky b_d	9 mm	Hloubka drážky	33 mm

Minimální šířka zubu:

$$b_{z1\min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{B_{z1\max} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,74 \cdot 0,0171 \cdot 0,1974}{1,8 \cdot 0,1974 \cdot 0,95} = 0,0074 \text{ m} \quad (4.25)$$

Kde $B_{z1\max} = 1,8$

Hloubka drážky:

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = \frac{0,53 - 0,392}{2} - 0,0033 = 0,036 \text{ m} \quad (4.26)$$

Hloubka drážky po úpravě s rozměry vodičů:

$$h_{d12} = 33 \text{ mm} \quad (4.27)$$

Skutečná délka h_{js} statoru je tedy:

$$h_{js} = h_{j1} + h_{d1} - h_{d12} = 0,0033 + 0,0036 - 0,0033 = 0,0036 \text{ m} \quad (4.28)$$

Šířka drážky:

$$b_{d1} = t_{d1} - b_{z1min} = 0,0171 - 0,0074 = 0,0097 \text{ m} \quad (4.29)$$

Skutečná šířka drážky je dána rozměry vodiče izolace a je **$b_{d1} = 9 \text{ mm}$** .

Aktivní hloubka drážky:

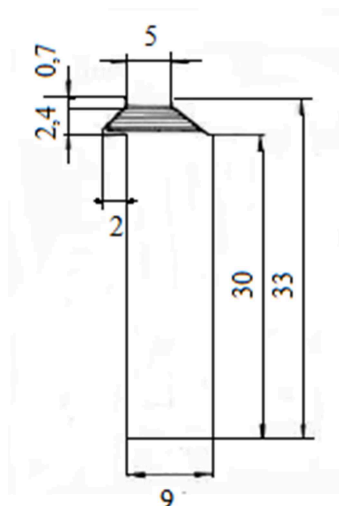
$$h_1 = h_{d1} - \left(h_0 + \frac{b_{d1} - b_0}{2} \right) = 0,033 - \left(0,0007 + \frac{0,009 - 0,005}{2} \right) = 0,03 \text{ m} \quad (4.30)$$

Minimální šířka zubu:

$$b_{z1min} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{d1})}{Q_1} - b_{1d} = \frac{\pi \cdot (0,392 + 2 \cdot 0,033)}{72} - 0,009 = 0,0052 \text{ m} \quad (4.31)$$

Maximální šířka zubu:

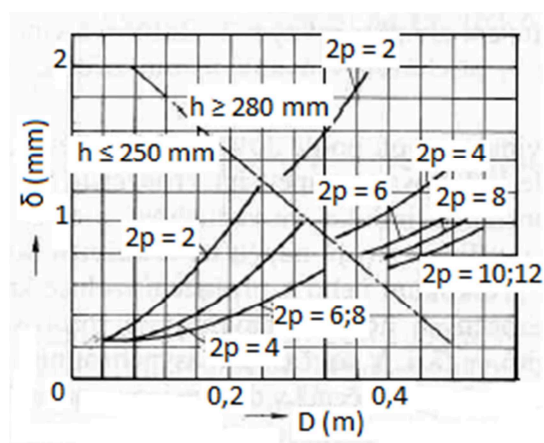
$$\begin{aligned} b_{z1max} &= \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot (h_{d1} - h_1))}{Q_1} - b_{1d} = \frac{\pi \cdot (0,392 + 2 \cdot (0,033 - 0,03))}{72} - 0,009 \\ &= 0,0086 \text{ m} \end{aligned} \quad (4.32)$$



Obrázek 27. Drážka statoru

Vzduchovou mezeru určíme pomocí obrázku č. 27.

$$\delta = 0,9 \text{ mm}$$



Obrázek 28. Velikost vzduchové mezery

4.3. Výpočet rotoru

Vnější průměr rotoru:

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,392 - 2 \cdot 0,0009 = 0,39 \text{ m} \quad (4.33)$$

Délku rotoru volíme o 5 mm delší než je délka statoru:

$$l_2 = l_1 + 0,005 = 0,1974 + 0,005 = 0,1979 \text{ m} \quad (4.34)$$

Počet drážek v rotoru volíme s vinutím tyčovým zlomkovým:

$$Q_2 = 2 \cdot p \cdot m_2 \cdot q_2 = 8 \cdot 3 \cdot 3,5 = 84 \quad (4.35)$$

Počet závitů ve fázi rotoru:

$$N_2 = \frac{U_{i2}}{4 \cdot k_b \cdot k_{v2} \cdot f_2 \cdot \Phi} = \frac{U_{i2}}{k_E \cdot U_{1N}} \cdot \frac{f_1}{f_2} \cdot N_1 \cdot \frac{k_{v1}}{k_{v2}} \quad (4.36)$$

Počet závitů v sérii jedné fáze rotoru:

$$N_2 = 2 \cdot p \cdot q_2 = 2 \cdot 4 \cdot 3,5 = 28 \quad (4.37)$$

Pólová rozteč:

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,39}{84} = 0,0146 \text{ m} \quad (4.38)$$

Dále pak provedeme kontrolu napětí na kroužku:

$$U_k = \sqrt{3} \cdot U_{1N} \cdot \frac{N_2}{N_1} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot \frac{28}{72} = 148,18 \text{ V} \quad (4.39)$$

Předběžný proud v rotoru:

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot p_i = 0,84 \cdot 123,3 \cdot 2,58 = 267,2 \text{ A} \quad (4.40)$$

Kde k_i je činitel uvažující vliv magnetizačního proudu a odporu vinutí na poměr I_1/I_2
činitel přepočtu proudu pro motory kroužkové:

$$p_i = \frac{m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{m_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2}} = \frac{3 \cdot 72 \cdot 0,933}{3 \cdot 28 \cdot 0,933} = 2,57 \quad (4.41)$$

Efektivní průřez vodiče rotoru:

$$S_{ef2} = \frac{I_2}{J_2} = \frac{267,2}{6,5 \cdot 10^6} = 41,10 \text{ mm}^2 \quad (4.42)$$

Předběžná šířka drážky:

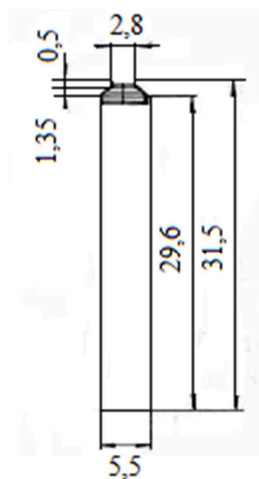
$$b_{d2} = 0,40 \cdot t_{d2} = 0,40 \cdot 14,6 = 0,00584 \text{ m} \quad (4.43)$$

Tabulka 5. Rozměry rotorové drážky.

Rozměry drážky typu D (mm)					
b_1	b_0	h_0	h_1	u	λ_z
5,5	2,8	0,5	1,35	1,25	0,553

Tabulka 6. Rozměrů drážky rotoru.

Šířka vodiče rotoru		Výška vodiče rotoru	
Vodič	3,55	Jedna vrstva	
Oboustranná izolace	1,7	Vodič	1 x 11,8
Vůle	0,1	Oboustranná izolace	1,7
			13,5
		Druhá vrstva	13,5
		Vložka mezi vrstvy	0,5
		Vložka na dno	0,5
		Část klínu v drážce	1,1
		Podložka pod klín	0,5
			29,6
		Závěr drážky	$1,35 + 0,5 = 1,85$
Šířka drážky	5,5 mm	Hloubka drážky	31,5 mm



Obrázek 29. Rozměry drážky rotoru

Předběžná šířka zubu:

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2}}{B_{z2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,74 \cdot 0,0146}{1,8 \cdot 0,95} = 0,067 \text{ m} \quad (4.44)$$

Nejmenší šířka drážky rotoru s D drážkami:

$$b_{z2min} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{d2})}{Q_2} - b_{d2} = \frac{\pi \cdot (0,39 - 2 \cdot 0,0315)}{84} - 0,0055 = 0,0067 \text{ m} \quad (4.45)$$

Největší šířka drážky:

$$b_{z2max} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_1)}{Q_2} - b_{d2} = \frac{\pi \cdot (0,39 - 2 \cdot 0,00185)}{84} - 0,0055 = 0,0091 \text{ m} \quad (4.46)$$

Hloubka drážky rotoru dána výškou vodiče, izolace je:

$$h_{d2} = 0,0315 \text{ m} \quad (4.47)$$

Vnitřní průměr rotoru:

$$D_i = D_h = k_h \cdot D_e = 0,23 \cdot 0,53 = 0,122 \text{ m} \quad (4.48)$$

4.4. Výpočet magnetického obvodu

Pokud máme určenou minimální a maximální šířku zubu statoru:

$$b_{z1min} = t_{d1} - b_{d1} = 0,0171 - 0,009 = 0,0081 \text{ m} \quad (4.49)$$

$$b_{z1max} = t_{d1} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot h_{d1}}{D}\right) - b_{d1} = 0,0171 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,033}{0,392}\right) - 0,009 = 0,011 \text{ m} \quad (4.50)$$

Můžeme určit indukce v různých průřezích zubu:

$$B_{z1max} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1min} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,74 \cdot 0,0171 \cdot 0,1974}{0,0081 \cdot 0,1974 \cdot 0,95} = 1,64 \text{ T} \quad (4.51)$$

$$B_{z1min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1max} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,74 \cdot 0,0171 \cdot 0,1974}{0,011 \cdot 0,1974 \cdot 0,95} = 1,21 \text{ T} \quad (4.52)$$

Střední indukce statoru:

$$B_{zlav} = \frac{B_{z1max} + B_{z1min}}{2} = \frac{1,64 + 1,21}{2} = 1,43 \text{ T} \quad (4.53)$$

Pokud máme maximální šíři zubu rotoru $b_{z2max}=14,7 \text{ mm}$ je indukce:

$$B_{z2min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot l_i}{b_{z2max} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,74 \cdot 0,0146 \cdot 0,1979}{0,0091 \cdot 0,1979 \cdot 0,95} = 1,25 \text{ T} \quad (4.54)$$

$$B_{z2max} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot l_i}{b_{z2min} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,74 \cdot 0,0146 \cdot 0,1979}{0,0067 \cdot 0,1979 \cdot 0,95} = 1,7 \text{ T} \quad (4.55)$$

Střední indukce rotoru je:

$$B_{z2av} = \frac{B_{z2max} + B_{z2min}}{2} = \frac{1,7 + 1,25}{2} = 1,48 \text{ T} \quad (4.56)$$

Indukce ve jhu statoru:

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{14,31 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,036 \cdot 0,1974 \cdot 0,95} = 1,06 \text{ T} \quad (4.57)$$

Výška jhu statoru:

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} = \frac{0,530 - 0,392}{2} - 0,033 = 0,036 \text{ m} \quad (4.58)$$

Indukce jhu rotoru:

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_{j2} \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe}} = \frac{14,31 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,085 \cdot 0,1975 \cdot 0,95} = 0,45 \text{ T} \quad (4.59)$$

Zdánlivá výška jha rotoru:

$$\begin{aligned} h'_{j2} &= \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} - \frac{2}{3} \cdot d_{vk2} \cdot m_{vk} = \frac{0,390 - 0,122}{2} - 0,0315 - \frac{2}{3} \cdot 0,025 \cdot 1 \\ &= 0,085 \text{ m} \end{aligned} \quad (4.60)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery:

$$U_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_e = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,74 \cdot 0,0009 \cdot 1,3 = 1376,6 \text{ V} \quad (4.61)$$

Carterův činitel:

$$k_e = k_{e1} \cdot k_{e2} = 1,18 \cdot 1,1 = 1,3 \quad (4.62)$$

$$k_{e1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{17,1}{17,1 - 2,9 \cdot 0,9} = 1,18 \quad (4.63)$$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{0,005}{0,0009}\right)^2}{5 + \left(\frac{0,005}{0,0009}\right)} = 2,9 \quad (4.64)$$

$$k_{e2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma_2 \cdot \delta} = \frac{14,6}{14,6 - 1,2 \cdot 0,9} = 1,1 \quad (4.65)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{0,0028}{0,0009}\right)^2}{5 + \left(\frac{0,0028}{0,0009}\right)} = 1,2 \quad (4.66)$$

Magnetické napětí zubu statoru:

$$U_{1z} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,033 \cdot 1005 = 66,35 \text{ V} \quad (4.67)$$

Intenzita magnetického pole v zubu platí pro:

- $B_{z1\max} = 1,64 \text{ T}$ - $H_{z1\max} = 1610 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
- $B_{z1\min} = 1,21 \text{ T}$ - $H_{z1\min} = 602 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
- $B_{z1\text{av}} = 1,48 \text{ T}$ - $H_{z1\text{av}} = 955 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$

$$H_{z1} = \frac{1}{6} \cdot (H_{z1\max} + 4 \cdot H_{z1\text{av}} + H_{z1\min}) = \frac{1}{6} \cdot (1610 + 4 \cdot 955 + 602) = 1005 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4.68)$$

Magnetické napětí zubu rotoru:

$$U_{2z} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,0315 \cdot 1076 = 67,8 \text{ V} \quad (4.69)$$

Podle Simpsonova pravidla určíme výslednou střední intenzitu magnetického pole, kde pro:

- $B_{z2\max} = 1,7 \text{ T}$ - $H_{z2\max} = 1900 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
- $B_{z2\min} = 1,25 \text{ T}$ - $H_{z2\min} = 651 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$
- $B_{z2\text{av}} = 1,44 \text{ T}$ - $H_{z2\text{av}} = 977 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$

$$H_{z2} = \frac{1}{6} \cdot (H_{z2\max} + 4 \cdot H_{z2\text{av}} + H_{z2\min}) = \frac{1}{6} \cdot (1900 + 4 \cdot 977 + 651) = 1076,5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4.70)$$

Činitel nasycení zubů:

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{66,35 + 67,8}{1376,6} = 1,097 \quad (4.71)$$

Magnetické napětí jha statoru:

- Pro $B_{j1} = 1,06 \text{ T}$ - $H_{j1} = 305 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$

$$U_{j1} = L_{j1} \cdot H_{j1} = 0,194 \cdot 305 = 59,17 \text{ V} \quad (4.72)$$

Délka indukční čáry statoru:

$$L_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,53 - 0,036)}{2 \cdot 4} = 0,194 \text{ m} \quad (4.73)$$

Magnetické napětí jha rotoru:

- Pro $B_{j2} = 0,44 \text{ T}$ - $H_{j2} = 152 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$

$$U_{j2} = L_{j2} \cdot H_{j2} = 0,0098 \cdot 152 = 1,49 \text{ V} \quad (4.74)$$

Délka indukční čáry ve jhu rotoru:

$$L_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_i - h_{j2})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,122 - 0,085)}{2 \cdot 4} = 0,0145 \text{ m} \quad (4.75)$$

Výsledné magnetické napětí na jednu pólovou dvojici:

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} = 1376,6 + 66,35 + 67,8 + 59,17 + 1,49 = 1571,4 \text{ V} \quad (4.76)$$

Činitel nasycení magnetického obvodu:

$$k_{\mu} = \frac{F_m}{U_{\delta}} = \frac{1571,4}{1376,6} = 1,14 \quad (4.77)$$

Magnetizační proud:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{4 \cdot 1571,4}{0,9 \cdot 3 \cdot 72 \cdot 0,933} = 34,7 \text{ A} \quad (4.78)$$

4.5. Výpočet odporů reaktancí

Střední délka závitu statorového vinutí:

$$l_{av1} = 2 \cdot (l_{d1} + l_{\zeta1}) = 2 \cdot (0,1974 + 0,275) = 0,945 \text{ m} \quad (4.79)$$

Délka čela statorového vinutí:

$$l_{\zeta1} = K_{\zeta1} \cdot b_{e1} + 2 \cdot B + h_{d1} = 1,07 \cdot 0,179 + 2 \cdot 0,025 + 0,033 = 0,275 \text{ m} \quad (4.80)$$

$$K_{\zeta1} = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,351^2}} = 1,07 \quad (4.81)$$

$$m = \frac{b + S}{t_{d1}} = \frac{3,5 + 3,5}{17,1} = 0,351 \quad (4.82)$$

Šířka cívkky:

$$b_{c1} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{d1})}{2 \cdot p} \cdot \beta_1 = \frac{\pi \cdot (0,392 + 2 \cdot 0,033)}{8} \cdot 1 = 0,179 \text{ m} \quad (4.83)$$

Vyložení čel statorového vinutí:

$$l_{v1} = K_{v1} \cdot b_{e1} + B + 0,5 \cdot h_{d1} = 0,188 \cdot 0,179 + 0,025 + 0,5 \cdot 0,033 = 0,045 \text{ m} \quad (4.84)$$

$$K_{v1} = 0,5 \cdot K_{\zeta1} \cdot m = 0,5 \cdot 1,07 \cdot 0,351 = 0,188 \quad (4.85)$$

Celková délka vodiče jedné fáze:

$$L_1 = N_1 \cdot l_{av1} = 72 \cdot 0,945 = 68,04 \text{ m} \quad (4.86)$$

Odpory

Odpor fáze statorového vinutí:

$$R_1 = k_R \cdot \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{S_{ef1} \cdot \alpha} = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{68,04}{14,68 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,056 \, \Omega \quad (4.87)$$

Poměrná hodnota odporu:

$$r_1 = R_1 \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1n}} = 0,056 \cdot \frac{123,3}{220} = 0,031 \quad (4.88)$$

Střední délka závitu rotorového vinutí:

$$l_{av2} = 2 \cdot (l_{d2} + l_{\check{c}2}) = 2 \cdot (0,1979 + 0,320) = 1,04 \, m \quad (4.89)$$

Délka čela rotorového vinutí:

$$l_{\check{c}2} = K_{\check{c}2} \cdot b_{e2} + 2 \cdot B_t = 1,6 \cdot 0,14 + 2 \cdot 0,05 = 0,324 \quad (4.90)$$

$$K_{\check{c}2} = \frac{1}{\sqrt{1 - m_t^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,78^2}} = 1,6 \quad (4.91)$$

$$m_t = \frac{b_2 + S_2}{t'_{d2}} = \frac{4 \cdot 2,6}{13,4} = 0,78 \quad (4.92)$$

$$t'_{d2} = \frac{\pi \cdot (D_2 - h_{d2})}{Q_2} = \frac{\pi \cdot (0,39 - 0,0315)}{84} = 0,0134 \, m \quad (4.93)$$

$$b_{e2} = \frac{\pi \cdot (D_2 - h_{d2})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,39 - 0,0315)}{8} = 0,14 \, m \quad (4.94)$$

Odpor fáze rotorového vinutí:

$$R_2 = k_R \cdot \rho_{115} \cdot \frac{L_2}{S_{ef2} \cdot a_2} = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{1,04 \cdot 28}{41,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,017 \, \Omega \quad (4.95)$$

Odpor přepočtený na počet závitů vinutí:

$$R'_2 = R_2 \cdot p_z = 0,017 \cdot 6,6 = 0,114 \, \Omega \quad (4.96)$$

Poměrná hodnota odporů vinutí rotoru:

$$r_2' = R_2' \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1n}} = 0,114 \cdot \frac{123,3}{220} = 0,06 \quad (4.97)$$

Činitel drážkové vodivosti statoru:

$$\begin{aligned} \lambda_{d1} &= \frac{h_3 - h_m}{3 \cdot b_d} \cdot k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_d} + \frac{3 \cdot h_1}{b_d + 2 \cdot b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) \cdot k_\beta' \\ &= \frac{30 - 1}{3 \cdot 9} \cdot 0,813 + \left(\frac{0,9}{9} + \frac{3 \cdot 2,4}{9 + 2 \cdot 5} + \frac{0,7}{5} \right) \cdot 0,75 = 1,337 \end{aligned} \quad (4.98)$$

Mezera bez mědi mezi vrstvami:

$$\begin{aligned} h_m &= 0,5 + 2 \cdot 0,2 = 0,9 = 1 \text{ mm} \\ h_1 &= 2,4 \text{ mm}, h_2 = 0,9 \text{ mm}, h_3 = 30 \text{ mm} \\ h_0 &= 0,7 \text{ mm}, b_0 = 5 \text{ mm}, b_d = 9 \text{ mm} \end{aligned}$$

Činitel:

$$k_\beta' = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot \beta) = \frac{1}{4} \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{2}{3} \right) = 0,75 \quad (4.99)$$

$$k_\beta = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot k_\beta') = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot 0,75) = 0,813 \quad (4.100)$$

Činitel magnetické vodivosti čel statoru:

$$\lambda_{\zeta 1} = 0,34 \cdot \frac{q_1}{l_i} \cdot (l_{\zeta 1} - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) = 0,34 \cdot \frac{3}{0,193} \cdot \left(0,275 - 0,64 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0,154 \right) = 1,1 \quad (4.101)$$

Ve statoru nejsou radiální ventilační kanály proto $n_{vk1} = 1$ a $b_{vk1} = 1$.

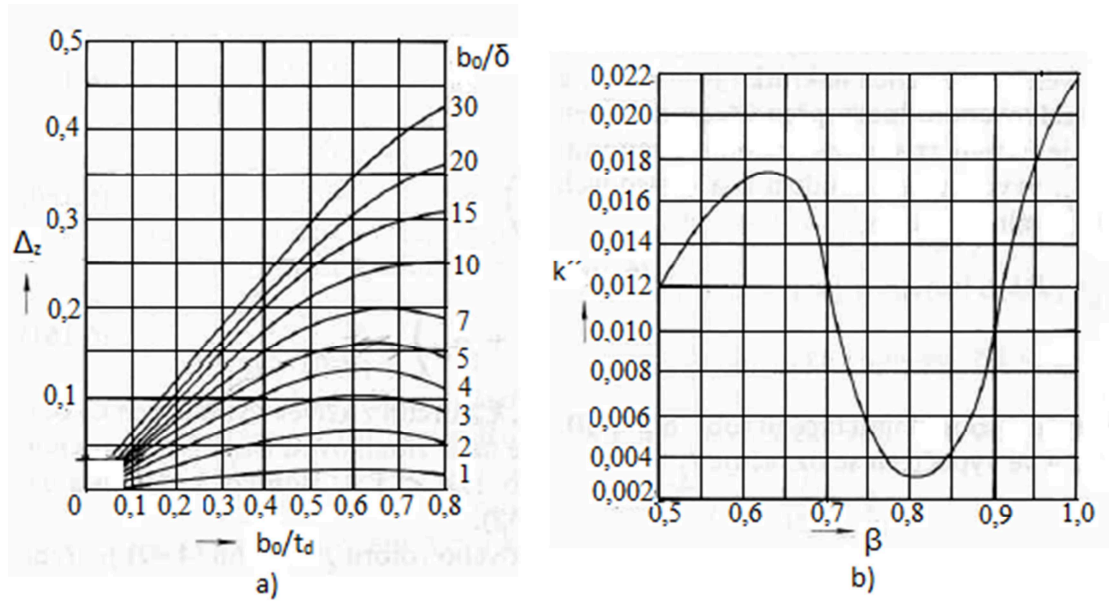
$$l_i' = 0,198 - 0,5 \cdot n_{vk1} \cdot b_{vk1} = 0,198 - 0,5 \cdot 1 \cdot 1 = 0,193 \quad (4.102)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu:

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_e} \cdot \xi = \frac{17,1}{12 \cdot 0,9 \cdot 1,3} = 1,22 \quad (4.103)$$

$$\xi = k'' \cdot q^2 + 2 \cdot k_\beta' - k_{v1}^2 \cdot (1 + \Delta_z) = 0,017 \cdot 3 + 2 \cdot 0,75 - 0,933^2 \cdot (1 + 0,1) = 0,594 \quad (4.104)$$

Z obrázku č. 30b vyplývá $k'' = 0,017$, a podle obrázku č 29b pro $b_0/\delta = 5/0,9 = 5,55$ a $b_0/t_{d1} = 5/17,1 = 0,29$ je $\Delta_z = 0,1$



Obrázek 30. a) Činitel Δ_z v závislosti na b_0/δ a b_0/t_{d1} , b) činitel k'' v závislosti na krácení kroku

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l'_i}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{d1} + \lambda_{\epsilon 1} + \lambda_{dif1}) \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{72}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,193}{4 \cdot 3} \cdot (1,337 + 1,1 + 1,22) = 0,240 \end{aligned} \quad (4.105)$$

Poměrná hodnota:

$$x_{1\sigma} = X_{1\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,240 \cdot \frac{123,3}{220} = 0,135 \quad (4.106)$$

Činitel magnetické vodivosti v drážce rotoru, podle ON 35 0868 $h_0 = 0,5$, $b_0 = 2,8$ mm jsou činitelé $k_\beta = k'_\beta = 1$.

$$\begin{aligned} \lambda_{d2} &= \frac{h_3 - h_m}{3 \cdot b_d} \cdot k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_d} + \frac{3 \cdot h_1}{b_d + 2 \cdot b_0} + \frac{h_0}{b_0}\right) \cdot k'_\beta \\ &= \frac{29 - 2,2}{3 \cdot 5,5} \cdot 1 + \left(\frac{2,45}{5,5} + \frac{3 \cdot 1,35}{5,5 + 2 \cdot 2,8} + \frac{0,5}{2,8}\right) \cdot 1 = 2,6 \end{aligned} \quad (4.107)$$

$$h_m = 1,7 + 0,5 = 2,2, h_1 = 1,35 \quad (4.108)$$

$$h_2 = 1,1 + 0,5 + \frac{1,7}{2} = 2,45, h_3 = 29 \quad (4.109)$$

Činitel magnetické vodivosti čel rotoru:

$$\lambda_{\xi 2} = 0,34 \cdot \frac{q_2}{l_i'} \cdot (l_{\xi 2} - 0,64 \cdot \beta_2 \cdot t_p) = 0,34 \cdot \frac{3,5}{0,193} \cdot (0,324 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,154) = 1,39 \quad (4.110)$$

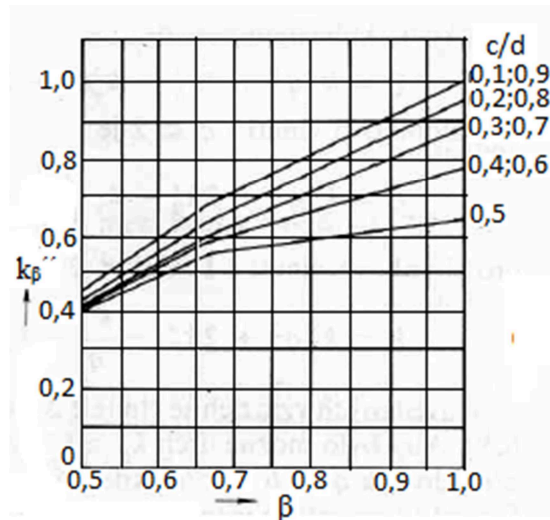
$$l_i' = l_2 - 0,5 = 0,198 + 0,5 = 0,193 \quad (4.111)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu:

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_e} \cdot \xi = \frac{13,4}{12 \cdot 0,9 \cdot 1,3} \cdot 0,7 = 0,67 \quad (4.112)$$

$$\begin{aligned} \xi &= k'' \cdot q^2 + 2 \cdot k_{\beta}'' - k_{v2}^2 \cdot \left(\frac{1}{d^2} + \Delta_z \right) = 0,0215 \cdot 3,5^2 + 2 \cdot 0,63 - 0,933^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + 0,45 \right) \\ &= 0,7 \end{aligned} \quad (4.113)$$

Podle obrázku č. 30b je pro $\beta = 1$ činitel $k'' = 0,0215$, podle obrázku č. 31 je pro $c/d \frac{1}{2}$ činitel $k_{\beta}'' = 0,63$ a podle obrázku č. 30ab pro $b_0/\delta = 2,8/0,9 = 3,11$ a $b_0/t_{d2} = 2,8/13,4 = 0,21$ je $\Delta_z = 0,45$



Obrázek 31. Činitel k_{β}'' v závislosti na poměrném zkrácení kroku vinutí β a zlomkové části čísla q

Rozptylová reaktance rotorového vinutí:

$$\begin{aligned} X_{2\sigma} &= 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_2}{100}\right)^2 \cdot \frac{l'_i}{p \cdot q_2} \cdot (\lambda_{d2} + \lambda_{\kappa 2} + \lambda_{dif2}) \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{28}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,193}{4 \cdot 3,5} \cdot (2,6 + 1,39 + 0,67) = 0,04 \, \Omega \end{aligned} \quad (4.114)$$

Přepočtená rotorová rozptylová reaktance:

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot p_z = 0,04 \cdot 6,6 = 0,264 \, \Omega \quad (4.115)$$

Poměrná hodnota:

$$x'_{2\sigma} = X'_{2\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 0,264 \cdot \frac{123,3}{220} = 0,144 \quad (4.116)$$

Vzájemná reaktance příčné větve pro náhradní schéma:

$$X_{12} = \frac{U_{1N}}{I_\mu} - X_{1\sigma} = \frac{220}{34,7} - 0,240 = 6,1 \, \Omega \quad (4.117)$$

Odpor příčné větve:

$$R_{12} = \frac{\Delta P_{Feh}}{m \cdot I_\mu^2} = \frac{455,5}{3 \cdot 34,7^2} = 0,126 \quad (4.118)$$

4.6. Výpočet ztrát

Ztráty v železe:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Feh} &= \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{zlav}^2 \cdot m_{z1}) \\ &= 1,75 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,4} \cdot (1,6 \cdot 1,06^2 \cdot 81,72 + 1,8 \cdot 1,43^2 \cdot 10,6) = 455,5 \, \text{W} \end{aligned} \quad (4.119)$$

Pro ocel 2312 podle GHOST, jsou měrné ztráty $\Delta_{p1,0} = 1,75 \, \text{W/kg}$; $\beta = 1,4$; $k_{dj1} = 1,6$; $k_{dz} = 1,8$

Hmotnost jha statoru je:

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \pi \cdot (D_e - h_{j1}) \cdot h_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} \\ &= \pi \cdot (0,53 - 0,036) \cdot 0,036 \cdot 0,1974 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 81,72 \, \text{kg} \end{aligned} \quad (4.120)$$

Hmotnost zubů statoru:

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1av} \cdot Q_1 \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = 0,033 \cdot 0,00305 \cdot 72 \cdot 0,1974 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \quad (4.121)$$

$$= 10,6 \text{ kg}$$

$$b_{z1av} = \frac{b_{z1min} + b_{z1max}}{2} = \frac{5,2 + 9}{2} = 3,05 \quad (4.122)$$

Povrchové ztráty v rotoru:

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_{02}) \cdot Q_2 l_{Fe2} = 795 \cdot (0,0134 - 0,0028) \cdot 84 \cdot 0,1979 = 140 \text{ W} \quad (4.123)$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2$$

$$= 0,5 \cdot 1,4 \cdot \left(\frac{72 \cdot 750}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,298 \cdot 0,0171 \cdot 10^3)^2 = 795 \text{ W} \cdot m^{-1} \quad (4.124)$$

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_e \cdot B_\delta = 0,31 \cdot 1,3 \cdot 0,74 = 0,298 \text{ T} \quad (4.125)$$

Povrchové ztráty ve statoru:

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} \cdot (t_{d1} - b_{01}) \cdot Q_1 l_{Fe1} = 305,3 \cdot (0,0171 - 0,0028) \cdot 72 \cdot 0,1974$$

$$= 62,05 \text{ W} \quad (4.126)$$

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{01} \cdot t_{d2} \cdot 10^3)^2$$

$$= 0,5 \cdot 1,4 \cdot \left(\frac{84 \cdot 750}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,202 \cdot 0,0134 \cdot 10^3)^2 = 305,3 \text{ W} \cdot m^{-1} \quad (4.127)$$

$$B_{01} = \beta_{01} \cdot k_e \cdot B_\delta = 0,21 \cdot 1,3 \cdot 0,74 = 0,202 \text{ T} \quad (4.128)$$

Pulzní ztráty v zubech rotoru:

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{p2} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{72 \cdot 750}{1000} \cdot 0,144 \right)^2 \cdot 32,27 = 103,3 \text{ W} \quad (4.129)$$

$$m_{z2} = h_{z2} \cdot b_{z2av} \cdot Q_2 \cdot l_{Fe2} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = 0,0315 \cdot 0,0079 \cdot 84 \cdot 0,1979 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \quad (4.130)$$

$$= 32,27 \text{ kg}$$

$$b_{z2av} = \frac{b_{z2min} + b_{z2max}}{2} = \frac{6,7 + 9,1}{2} = 7,9 \quad (4.131)$$

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2 \cdot t_{d2}} \cdot B_{z2av} = \frac{2,9 \cdot 0,0009}{2 \cdot 0,0134} \cdot 1,48 = 0,144 \text{ T} \quad (4.132)$$

Pulzní ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n}{1000} \cdot B_{p1} \right)^2 \cdot m_{z1} = 0,11 \cdot \left(\frac{84 \cdot 750}{1000} \cdot 0,045 \right)^2 \cdot 10,6 = 9,37 \text{ W} \quad (4.133)$$

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2 \cdot t_{d1}} \cdot B_{z2av} = \frac{1,2 \cdot 0,0009}{2 \cdot 0,0171} \cdot 1,43 = 0,045 \text{ T} \quad (4.134)$$

Dodatečné ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 62,05 + 140 + 9,37 + 103,3 = 314,72 \text{ W} \quad (4.135)$$

Celkové ztráty:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 455,5 + 314,72 = 770,22 \text{ W} \quad (4.136)$$

Ztráty mechanické:

$$\Delta P_{mech} = 1,2 \cdot 2 \cdot p \cdot t_p^3 \cdot (n_{vk} + 11) \cdot 10^3 = 1,2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 0,154^3 \cdot 11 \cdot 10^3 = 385,68 \text{ W} \quad (4.137)$$

Ztráty třením na kartáčích:

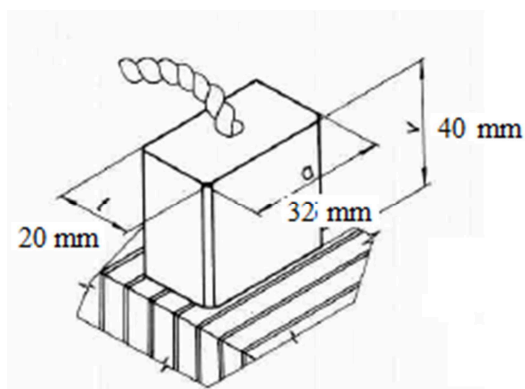
$$\Delta P_{fk} = K_f \cdot p_k \cdot S_k \cdot v_k = 0,16 \cdot 17 \cdot 10^3 \cdot 76,8 \cdot 10^{-4} \cdot 6,28 = 131,2 \text{ W} \quad (4.138)$$

Pro kartáče K 82 platí $p_k = 17 \cdot 10^3 \text{ Pa}$, hustota proudu v kartáčích $J_k = 12 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Plocha kartáčů na jednom kroužku:

$$S'_k = \frac{I_2}{J_k} = \frac{267}{12} = 22,25 \text{ cm}^2 \quad (4.139)$$

Volíme rozměr kartáčku 20 x 32 x 32 mm.



Obrázek 32. Kartáček s rozměry

Počet kartáčků:

$$n_k = \frac{S'_k}{l \cdot \check{s}} = \frac{22,25}{2 \cdot 3,2} = 3,5 = 4 \quad (4.140)$$

Skutečná hustota proudu v kartáčkách:

$$J_k = \frac{I_2}{l \cdot \check{s} \cdot n_k} = \frac{267}{2 \cdot 3,2 \cdot 4} = 10,43 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \quad (4.141)$$

Plocha kartáčů na třech krouzcích:

$$S_k = l \cdot \check{s} \cdot n_k \cdot m = 2 \cdot 3,2 \cdot 4 \cdot 3 = 76,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (4.142)$$

Průměr kroužků je 0,16 m je jejich obvodová rychlost:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,16 \cdot 750}{60} = 6,28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.143)$$

Ztráty v železe, mechanické, třením na kartáčku je:

$$\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{fk} = 770,22 + 385,65 + 131,2 = 1287,07 \text{ W} \quad (4.144)$$

Dodatečné ztráty při jmenovitém chodu:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_{1N} = 0,005 \cdot \frac{P_{2N}}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{60 \cdot 10^3}{0,92} = 326 \text{ W} \quad (4.145)$$

4.7. Chod naprázdno

Proud na prázdno:

$$I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{0j}^2} = \sqrt{(2,25^2 + 34,7^2)} = 34,77 \text{ A} \quad (4.146)$$

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{fk} + \Delta P_{j0}}{m \cdot U_{1n}} = \frac{770,22 + 385,65 + 131,2 + 202,28}{3 \cdot 220} = 2,25 \quad (4.147)$$

$$\Delta P_{j0} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{\mu}^2 = 3 \cdot 0,056 \cdot 34,7^2 = 202,28 \text{ W} \quad (4.148)$$

Účinník naprázdno:

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\check{c}}}{I_0} = \frac{2,25}{34,77} = 0,065 \quad (4.149)$$

4.8. Výpočet charakteristik

Činitel rozptylu:

$$c_1 = 1 + \frac{X_{1\sigma}}{X_{12}} = 1 + \frac{0,240}{6,1} = 1,04 \quad (4.150)$$

$$a' = c_1^2 = 1,04^2 = 1,082 \Omega; \quad b' = 0 \quad (4.151)$$

$$a = c_1 \cdot R_1 = 1,04 \cdot 0,056 = 0,058 \Omega \quad (4.152)$$

$$b = c_1 \cdot (X_{1\sigma} + c_1 \cdot X_{2\sigma}') = 1,04 \cdot (0,240 + 1,04 \cdot 0,264) = 0,535 \Omega \quad (4.153)$$

Činná složka proudu statoru při synchronním chodu:

$$I_{(0)\check{c}} = \frac{\Delta P_{Feh} + 3 \cdot R_1 \cdot I_{\mu}^2}{m \cdot U_{1N}} = \frac{455,5 + 3 \cdot 0,056 \cdot 34,7^2}{3 \cdot 220} = 1 \text{ A} \quad (4.154)$$

Jmenovitý skluz:

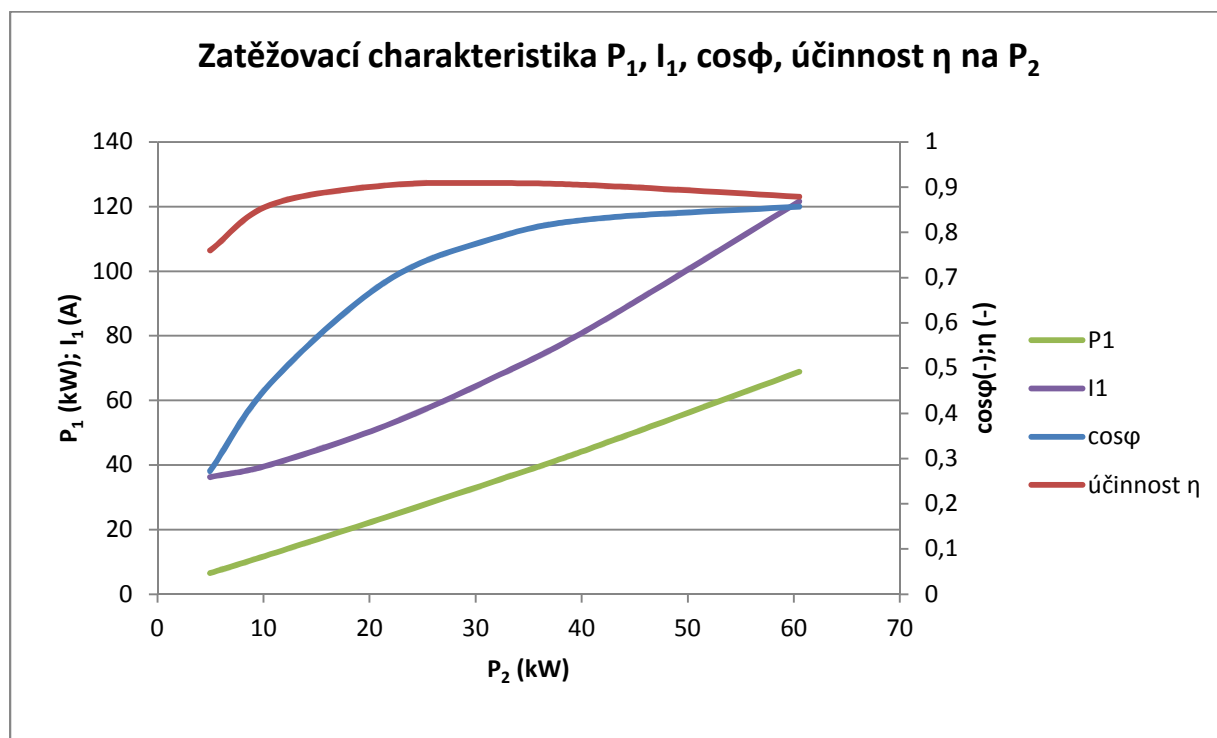
$$s_N \approx r_2' = 0,064 \quad (4.155)$$

Pro $P_{2N} = 60 \text{ kW}$; $U_{1N} = 220 \text{ V}$; $2p = 8$; $I_{1N} = 123,3 \text{ A}$; $\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{fk} = 1287,7 \text{ W}$; $\Delta P_d = 326 \text{ W}$; $I_{(0)\epsilon} = 1 \text{ A}$; $I_{(0)j} \sim I_{\mu} = 34,7 \text{ A}$; $R_1 = 0,056 \Omega$; $R'_2 = 0,114 \Omega$; $c_1 = 1,04$; $a' = 1,082 \Omega$; $a = 0,058 \Omega$; $b' = 0 \Omega$; $b = 0,535 \Omega$; $U_k = 148,18 \text{ V}$

Tabulka 7. Vypočtené hodnoty charakteristiky motoru 60 kW

	Vzorce	Jedn.	Skluz					
			0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	Sn=0,064
1.	$a' \cdot R'_2/s$	Ω	24,669	12,334	6,167	4,111	3,083	1,927
2.	$b' \cdot R'_2/s$	Ω	0	0	0	0	0	0
3.	$R = a + a' \cdot R'_2/s$	Ω	24,727	12,392	6,225	4,169	3,141	1,985
4.	$X = b + b' \cdot R'_2/s$	Ω	0,535	0,535	0,535	0,535	0,535	0,535
5.	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ω	24,732	12,403	6,247	4,203	3,186	2,055
6.	$I_2'' = U_{1N}/Z$	A	8,895	17,737	35,216	52,343	69,052	107,055
7.	$\cos\varphi_2' = R/Z$	-	0,999	0,999	0,996	0,991	0,985	0,965
8.	$\sin\varphi_2' = X/Z$	-	0,021	0,043	0,085	0,127	0,167	0,260
9.	$I_{1\epsilon} = I_{(0)\epsilon} + I_2'' \cdot \cos\varphi_2'$	A	9,886	18,719	36,075	52,871	69,016	104,308
10.	$I_{1j} = I_{(0)j} + I_2'' \cdot \sin\varphi_2'$	A	34,886	35,462	37,693	41,347	46,231	62,53
11.	$I_1 = \sqrt{I_{1\epsilon}^2 + I_{1j}^2}$	A	36,259	40,099	52,174	67,118	83,069	121,61
12.	$I_2' = c_1 \cdot I_2''$	A	9,250	18,446	37,518	54,436	71,84	111,337
13.	$P_1 = P_p = 3 \cdot U_{1N} \cdot I_{1\epsilon} \cdot 10^{-3}$	kW	6,524	12,354	23,809	34,894	45,550	68,843
14.	$\Delta P_{1j} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \cdot 10^{-3}$	kW	0,220	0,270	0,457	0,756	1,159	2,484
15.	$\Delta P_{2j} = 3 \cdot R'_2 \cdot I_2'^2 \cdot 10^{-3}$	kW	0,030	0,116	0,481	1,013	1,765	4,239
17.	$\Delta P_{ds} = \Delta P_d \cdot (I_1/I_{1N})^2$	kW	0,028	0,034	0,058	0,096	0,148	0,317
18.	$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{fk} + \Delta P_{1j} + \Delta P_{2j} + \Delta P_{ds}$	kW	1,565	1,707	2,283	3,152	4,359	8,327
19.	$P_2 = P_1 - \Delta P$	kW	4,959	10,647	21,526	31,742	41,191	60,516
20.	$\eta = 1 - \Delta P/P_1$	-	0,76	0,861	0,904	0,909	0,904	0,879
21.	$\cos\varphi = I_{1\epsilon}/I_1$	-	0,272	0,466	0,691	0,787	0,830	0,857

Graf 1. Zatěžovací charakteristika Navrženého motoru v závislosti P_1 , I_1 , $\cos\phi$, účinnost η na P_2



Jmenovité hodnoty navrženého motoru P_{2N} 60 kW; U_{1N} = 220/380 V; I_{1N} = 123,3 A; η_N = 0,879; $\cos\phi$ = 0,857

.

$$R = a + a' \cdot \frac{R_2'}{s_{max}} = 0,058 + 1,082 \cdot \frac{0,114}{0,12} = 1,086 \, \Omega \quad (4.156)$$

$$X = b + b' \cdot \frac{R_2'}{s_{max}} = 0,535 \quad (4.157)$$

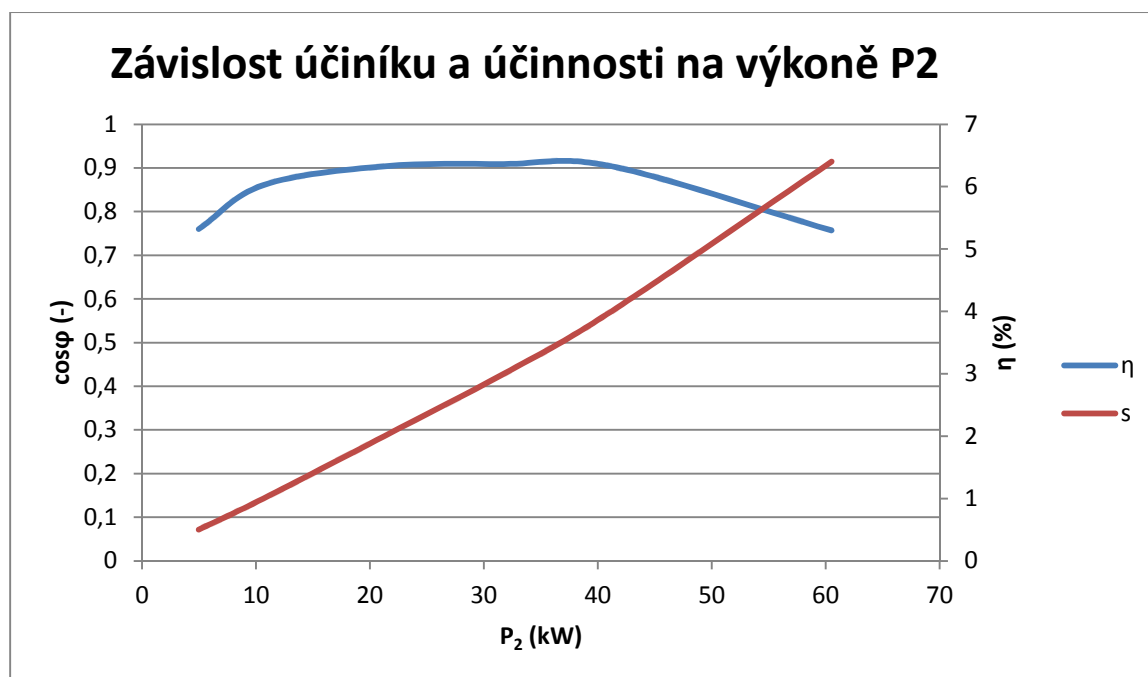
$$I_2' = c_1 \cdot \frac{U_{1N}}{\sqrt{R^2 + X^2}} = 1,04 \cdot \frac{220}{\sqrt{1,086^2 + 0,535^2}} = 189 \, A \quad (4.158)$$

$$m_{max} = \frac{M_{max}}{M_N} = \left(\frac{I_2'}{I_{2N}} \right)^2 \cdot \frac{s_N}{s_{max}} = \left(\frac{189}{111,337} \right)^2 \cdot \frac{0,064}{0,12} = 1,53 \quad (4.159)$$

Tabulka 8. Momenty

Jmenovitý výkon (kW)	Hodnoty momentů pro 8 pólový motor			
	m_z	m_{\min}	m_{\max}	i_z
40 - 63	1,2	0,9	1,7	5,5 – 6,5

Graf 2. Charakteristika účinnosti a účinníku.



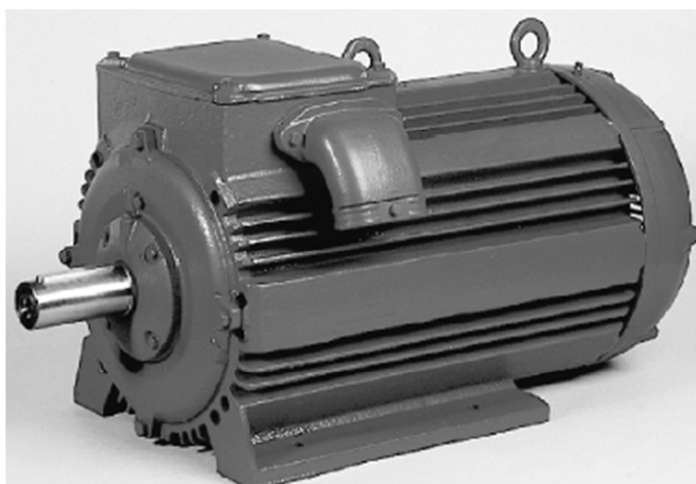
4.9. Typová volba asynchronního motoru na trhu.

Pro vypočtený asynchronní motor a daný jeřáb vyhovuje motor firmy Siemens Elektromotory s.r.o.

V jejich nabídce jsou trojfázové asynchronní hutní jeřábové kroužkové motory s trvale přiloženými kartáči určené pro pohon jeřábu nebo jiných dopravních zařízení s charakterem přerušovaného chodu. Dané motory mohou být používány jen v souladu jejich specifikací, aby byla zajištěna jejich spolehlivá funkčnost.

Tabulka 9. AS motor Siemens parametry.

Typ 280 M08	Zatěžovatel (%)		P (kW)	n (min ⁻¹)	M _N (nM)	M _{max} /M _N	I ₁ (A)
	25		78	730	1021	2,9	166
	40		68	735	884	3,3	149
	60		58	735	645	3,9	134
I ₂ (A)	U ₂ (V)	R ₂ (Ω)	J motor (kgm ²)	J příd. (kgm ²)		Hm. (kg)	
110	448	0,043	3,5	6,7		865	
96	448						
82	448						



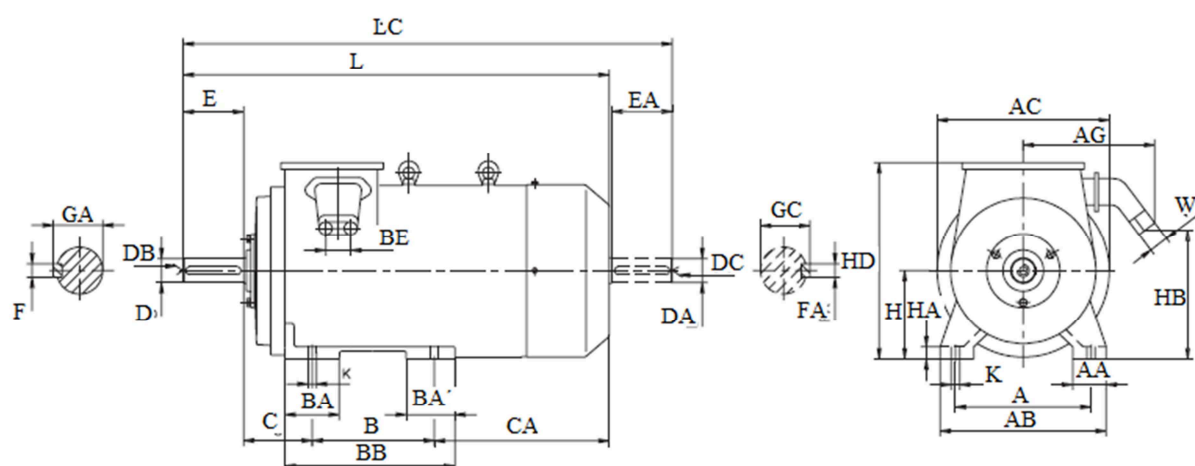
Obrázek 33. Kroužkový motor Siemens.

V základním provedení uvádí výrobce:

Za základní provedení se považuje trojfázový asynchronní hutní jeřábový kroužkový motor:

- tvaru IM 1001 - patkový s jedním válcovým koncem hřídele, s rozměry podle rozměrových tabulek
- v krytí IP 44 - motor zavřený
- u osových výšek 112 a 6 200 mm s povrchovým chlazením IC 411
- u osových výšek 225 a 6 400 mm s povrchovým chlazením IC 511

- motory velikostí 112 a 132 mm mají svorkovnicový kryt opatřen dvěma ucpávkovými vývodkami, motory velikostí 160 až 400 mm mají svorkovnicový kryt opatřen dvou hrdlovou kabelovou koncovkou
- pro přerušovaný chod S3 a zatěžovatel 40%
- pro jmenovité napětí 380 V
- pro jmenovitý kmitočet 50 Hz
- pro teplotu prostředí od -30 C do +50 C
- pro prostředí složitě: mokré s relativní vlhkostí vzduchu do 95%/25 C, studené s teplotou od -30 C, horké s teplotou do +50 C
- nejvyšší dovolené průběžné otáčky 200% jmenovitých otáček
- s izolačním systémem teplotní třídy izolace F
- pro nadmořskou výšku do 1 000 m
- s vnějším nátěrem šedým [11]



Obrázek 34. Rozměry asynchronního kroužkového motoru Siemens

Tabulka 10. Rozměry Asynchronního motoru Siemens P280M08

A	AA	AB	AC	AG	B	BA	BA'
457	100	557	570	360	419	180	200
BB	BE	C	CA	D	DA	DB	DC
670	85	190	563,5	80m6	65m6	M20	M20

Technické data uváděné výrobcem:

- Napětí a kmitočet
- Chvění - Motory v základním provedení splňují podmínky mohutnosti mechanického kmitání kategorie N odpovídající hodnotám pro osovou výšku 280 mm $v_e \leq 4,5$ mm/s.
- Provedení motorů – patkové a přírubové
- Svorkovnicový kryt - Svorkovnicový kryt u všech velikostí je umístěn na vrchu kostry motoru. U motorů velikosti osové výšky 112 až 132 mm včetně je opatřen dvěma ucpávkovými vývodkami a u velikostí 160 až 400 mm dvou hrdlovou kabelovou koncovkou kterou je možno přímo na místě montáže přesunout na opačnou stranu svorkovnicového krytu.
- Svorkovnice - Svorkovnice motorů velikosti osové výšky 112 až 280 mm je opatřena třemi připojovacími svorkami pro připojení přívodního kabelu označenými U, V, W. Připojení spouštěče ke sběracímu ústrojí rotoru se provádí přímo na svorky kartáčových držáků. U motorů velikosti osové výšky 160 až 400 mm jsou pro připojení přívodního kabelu vyvedeny do prostoru svorkovnicového krytu 3 vývody od statorového vinutí opatřené kabelovými oky a šroubovými svorkami označenými U, V, W.
- Sběrací ústrojí - Sběrací ústrojí je u motorů všech velikostí umístěno uvnitř motoru. U motorů velikosti osové výšky 112 až 280 mm je umístěno na zadní straně motoru (strana D) a je přístupné po odejmutí víka svorkovnice. U motorů velikosti osové výšky 315 až 400 mm je umístěno na přední straně (strana N) a je přístupné po sejmutí vík na předním štítu. Trvanlivost kartáčů u motorů všech velikostí při přerušovaném chodu S3, zatěžitelnosti 40% a 10-ti minutovém pracovním cyklu je minimálně 8 000 hodin.
- Hřídelové konce - Rotory s hřídelí jsou dynamicky vyváženy s polovinou pera a jsou na čelní ploše konce hřídele označeny v souladu s ČSN ISO 8821 písmenem H. Pero umístěné v konci hřídele je součástí dodávky. Hřídele motorů základního provedení jsou opatřeny středícím důlkem se závitem podle ČSN 01 4917 (1992).
- Ložiska - Motory všech velikostí jsou na straně N osazeny kuličkovými ložisky. Na straně D jsou motory osové výšky 112 až 225 mm včetně osazeny kuličkovými ložisky, motory osové výšky 250 až 400 mm včetně jsou na straně D osazeny válečkovými ložisky.
- Dovolené oteplení - Motory jsou vyráběny s izolačním systémem odpovídajícím teplotní třídě izolace F. Teplotní třída izolace je volena výrobcem motorů a je uvedena na výkonostním štítku motoru. Dovolené oteplení vinutí pro teplotní třídu izolace F při teplotě chladiwa do 50 C je 90 C.
- Ochrana motoru - Motory musí být jištěny proti přetížení a zkratu. Proti tepelnému přetížení nadproudem nutno motory chránit nadproudovým relé. Pro dokonalou ochranu motoru lze použít kombinace nadproudové ochrany s vestavnou tepelnou ochranou. Po dohodě s výrobcem je možno dodávat motory s teplotními čidly - PTC termistory nebo bimetalovými

teplotními čidly zabudovanými v tepelně kritické části vinutí motoru. Vývody od těchto teplotních čidel jsou vyvedeny do svorkovnicového krytu na přístrojovou svorkovnici. Teplotní čidla tvoří tepelně citlivou část vestavné tepelné ochrany, která se připojuje k řídicí soustavě. Druh vestavné tepelné ochrany je TP 111 dle ČSN 35 0000, část 11-1. Tato vestavná tepelná ochrana je účinná při tepelných přetíženiích způsobených poruchami chlazení, nadměrným vzrůstem teploty chladiva, pozvolným mechanickým přetíženiím, dlouhodobým poklesem napětí nebo přepětím. Při dosažení kritického oteplení vinutí motoru odpojí vestavná tepelná ochrana ve spolupráci s řídicí soustavou motor od napájecí sítě. Vestavná tepelná ochrana je účelným a jednoduchým doplňkem nadproudové ochrany v těch poruchových stavech, kdy tato není schopna dokonale motor chránit. Pro připojení vestavné tepelné ochrany k řídicí soustavě je svorkovnicová skříň opatřena závitovým otvorem P 21, který je od výrobce zaslepen ucpávkovou zátkou pro případ, že nebude použit. Vzhledem k určení a z toho vyplývajícího způsobu zatěžování motorů řady P, VP je vhodné používat tyto motory v provedení se zabudovanou vestavnou tepelnou ochranou. [12]

Tabulka 11. Srovnání parametrů motorů výpočteného, navrhnutého a stávajícího.

Srovnání motorů									
	I_1 (A)	I_2 (A)	U_N (V)	v (ot/min)	P_N (W)	Osová Výška (mm)	$\cos\varphi$ (-)	Zatěžo. (%)	Cena
Vypoč.	121,6	111,4	380	705	60,5	280	0,857	40	-
Navrh.	149	96	380	735	68	280	0,9	40	313000
Stávaj.	121	114	380	725	60	355	0,842	40	-

5. Závěr

Cílem této diplomové práce se zabývá návrhem trojfázového asynchronního motoru s kotvou kroužkovou s parametry: 60 kW, 220/380 V D/Y, 750 otáček za minutu a zatěžovatelem 40 %, pro pohon zdvihu teleskopického jeřábu kategorie H. na začátku práce jsou popsány principy, použití a vlastnosti charakteristiky trojfázových asynchronních motorů. V následující kapitole je popsán rozbor různých typů jeřábu a následně přiblížen teleskopický jeřáb s nosností 10 000 kg. V této kapitole byl i specifikovaný potřebný výkon motoru, tak aby výkon motoru byl dostatečný pro zdvih břemene a následnou manipulaci.

Učení potřebného výkonu motoru je důležitý pro následný typový výpočet trojfázového asynchronního motoru s kotvou kroužkovou, od toho se vyvíjí rozměry a celý postup návrhu jednotlivých součástí.

Praktická část je zaměřena na podrobný postup výpočtu třífázového asynchronního motoru s kotvou kroužkovou o výkonu $P = 60$ kW, napětím na statoru $U = 220/380$, otáčkami 750 ot/min zapojením do trojúhelníka Y, a frekvencí 50 Hz. Po určení hlavních rozměrů statorového a rotorového svazku se navrhnou typy drážek a vinutí, jak rotoru, tak statoru. Po návrhu konstrukčních částí se ověřuje, zdá-li jednotlivé magnetické indukce a intenzita magnetického pole vyhovuje. To se ověří výpočtem jednotlivých ztrát jak mechanických, dále ztrát v železe a dalším ztrátám. Přechází se na výpočet odporů a reaktancí.

Poté se vypočtou jednotlivé parametry, viz tabulka č. 7. pro různé druhy skluzu, S nichž se vykreslí zatěžovací charakteristiky uvedené v grafu č. 1.

Ve zhodnocení je navrhnut typový motor dodávaný na trhu firmou Siemens Elektromotory s.r.o. V dnešní době se od kroužkových motorů upouští a přechází se na motory s kotvou nakrátko, kde se využívá řízení frekvence kmitočtu. Tyto pohony se vykazují plynulou regulací a vyšší účinností, kdežto u kroužkových je řízení otáček skoková.

Literatura

- [1] Kopylov, Igor, Petrovič.: Stavba elektrických strojů, SNTL/MIR, Praha 1988, [Citace].
- [2] Cigánek, Ladislav: Stavba elektrických strojů, SNTL, Praha 1958.
- [3] Kačor, Petr: Vybrané typy elektrických strojů, VŠB-TU, Ostrava 2010, [Citace].
- [4] Havelka, O.: Elektrické přístroje, SNTL, Praha, 1985.
- [5] Fetter, F.: Asynchronní motory, SNTL, 1966, Praha.
- [6] Petrov: Elektrické stroje 2, ACADEMIA, Praha 1982,[Citace].
- [7] Chmelík. K.: Asynchronní a synchronní elektrické stroje, ISBN, Ostrava 2001,[Citace].
- [8] Traverzové jeřáby. Dostupné z [www](http://www.az-jeřaby.cz/).
<http://www.az-jeřaby.cz/>
- [9] Jeřáby popis. Dostupné z [www](http://www.mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-str-01.05_jeřaby.pdf).
http://www.mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-str-01.05_jeřaby.pdf
- [10] Asynchronní motory. Dostupné z [www](http://www.p.kobrlle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf).
<http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>
- [11] Asynchronní motory s kotvou kroužkovou. Dostupné z [www](http://www.elektromotory.net/siemens/p-1500-otacek.html).
<http://www.elektromotory.net/siemens/p-1500-otacek.html>
- [12] Hutní jeřábové motory.[Citace], Dostupné z [www](http://www.elektromotory.net/upload/file/katalog_p.pdf).
http://www.elektromotory.net/upload/file/katalog_p.pdf
- [13] Stavebnicové odporníky MEZ Postřelmov. Dostupné z [www](http://www.tzbinfo.cz/download.py?file=docu/clanky/0039/003990_MEP_vyrobní_program.pdf).
http://www.tzbinfo.cz/download.py?file=docu/clanky/0039/003990_MEP_vyrobní_program.pdf.
- [14] Stavebnicové odporníky. [Citace], Dostupné z [www](http://www.sub.cz/mep-postrelmov/odporove-pristroje/spoustece-a-brzdove-odporniky.aspx).
<http://www.sub.cz/mep-postrelmov/odporove-pristroje/spoustece-a-brzdove-odporniky.aspx>